LE MILIEU PHYSIQUE ET LES SOLS DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

Conséquences pour la mise en valeur agricole

Michel RAUNET

1991

Résumé

Cette édition sur cdrom du travail de Michel Raunet sur le «Milieu physique et les sols de l'île de la Réunion : conséquences pour la mise en valeur agricole» a été possible grâce à l'existence d'une édition papier. Le livre correspondant, publié en 1991, a été scanné. L'imagerie et les textes ont été extraits, traduits numériquement et balisés afin de disposer d'une structure identique à celle du livre. Le cd-rom produit ainsi est exploitable sur les écrans de tous les types d'ordinateurs grâce au logiciel gratuit Acrobat.Reader... La version que vous visualiserez est imprimable directement à la manière de l'édition originale réalisée par le Cirad dont nous avons respecté au maximum la structure. L'extraction d'information peut être réalisée à partir des nombreux aides disponibles : tables des matières, des tableaux, des figures et des photos, renvois dans le texte, index, moteur de recherche d'Acrobat (tous les mots utiles sont indexés : avec Acrobat Search, vous obtiendrez rapidement les occurences de n'importe quelle expression). Les figures ont été traités de manière à pouvoir être grossies jusqu'à 3 fois leur taille originale et pour restituer leur résolution d'origine lorsque l'utilisateur souhaite les imprimer. Nous n'avons pas tenté de mises à jour à cette occasion mais ce recueil d'informations est très demandé tel quel pour sa richesse et son approche originale. Enfin vous disposez, sur ce cdrom, d'une aide vidéo destinée à apporter l'aide nécessaire à l'utilisation d'Acrobat pour la plus large exploitation du potentiel offert ici.

PRÉFACE

La Réunion, comme toutes les îles tropicales, constitue un milieu particulièrement fragile.

La diversité et la beauté des paysages qui en font sa richesse sont menacées à terme par la pression anthropique, dont les nuisances sont souvent le fait d'une méconnaissance au milieu naturel et d'une mauvaise appréciation de ses équilibres.

Notre île n'est pas seulement un spectacle offert au touriste émerveillé et un paradis pour le naturaliste. Elle doit faire vivre une population agricole nombreuse. De par la diversité de ses situations écologiques favorables, l'île peut proposer une large gamme de produits agricoles «tempérés» et tropicaux.

Concilier la conservation de l'environnement et une agriculture «reproductible», faisant bien vivre les gens, est l'objectif prioritaire de la politique régionale.

La connaissance à la fois globale et régionalisée de la dynamique du milieu naturel est la base indispensable d'une politique rationnelle d'aménagement du territoire, tendant à concilier écologie, agriculture, forêt, tourisme et urbanisme. Le pari est difficile à tenir car les intérêts s'opposent souvent. L'intensification de l'agriculture, la protection des sols contre l'érosion et la conservation de la diversité biologique naturelle sont trois volets particulièrement sensibles d'un tel équilibre.

A ce titre, la Réunion peut être considérée comme un «laboratoire insulaire tropical» regardé de près par les îles voisines de l'océan indien.

Pour bien gérer, il faut donc bien connaître. Dans cette voie, ouverte par de nombreux et illustres prédécesseurs, Monsieur RAUNET nous propose un «État des lieux»; présenté d'une façon interdisciplinaire qui manquait un peu à la Réunion. Cette contribution a pour «noyau dur» les sols et leur mise en valeur agricole.

Je pense que par son approche originale, l'auteur a réussi à mettre à la portée d'un large public les particularités pédologiques de l'île, chose difficile quand on sait la réputation d'ésotérisme de cette discipline, même auprès des autres spécialistes de la nature.

Cet ouvrage, qui apporte une meilleure connaissance des sols de la Réunion, sera utile à divers publics. Tout d'abord, il devrait constituer un outil de référence pour les praticiens et responsables en matière d'aménagement du territoire et de développement agricole. Ensuite, au niveau pédagogique, il pourra être un guide pour étudiants et enseignants.

D'autre part, il pourra suggérer quelques directions de recherche appliquée ou plus fondamentale ayant trait au milieu physique et à l'agronomie. Enfin, il n'est pas interdit au public simplement «curieux» d'apprendre ce qu'est un «andosol» le plus spécifique des sols réunionnais et quelles sont ses curieuses propriétés.

Pierre LAGOURGUE

Président du Conseil Régional de la Réunion 1991

REMERCIEMENTS

Ce travail, réalisé grâce à des financements de la Région Réunion et du CIRAD (A.3), a bénéficié de l'appui d'une équipe qu'il m'est agréable de remercier. Je pense tout particulièrement à

- Jean SERVANT, responsable du CIRAD (A.3) à la Réunion, qui, conscient de la nécessité, m'a poussé à entreprendre cette tâche et m'a ensuite constamment encouragé lorsqu'il sentait des «baisses de régimes».(NDR : M. Trebel est le délégué du Cirad-Réunion en 2001, date de réalisation de ce cd-rom)
- Mes collègues et amis du CIRAD (A.3), spécialement
  - Marinus BROUWERS,
  - Pierre-François CHABALIER,
  - Roger MICHELLON,
  - Sylvain PERRET,

  qui ont toujours été disponibles pour m'éclairer dans leurs domaines et apporter des critiques constructives au texte.
- Mes amis géologues, Patrick BACHELERY et Philippe MAIRINE, qui, à l'occasion de nombreuses tournées m'ont fait découvrir quelques «clés» du volcanisme de l'île en échange de clés de pédologie.
- Paul QUANTIN (ORSTOM -A.3-, Bondy) qui m'a fait bénéficier de son expérience en matière d'andosols.
- Jean-Claude GIRARD (IRAT (A.3)) et Joël DUPONT de la SREPEN (A.3) (Société Réunionnaise pour la Protection de l'Environnement), qui m'ont éclairé sur la flore de l'île et sa fragilité.

Je n'oublierai pas, à Montpellier, de remercier pour son dévouement l'équipe du service de Cartographie - Christian GOUNEL, Agnès LHERBET et Guilhem GRELLET - qui a assuré avec compétence la réalisation des cartes et figures ainsi que le montage de la maquette.

Un grand merci enfin à Nathalie JEAN pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa patience pendant la longue période de mise en forme du texte.

En dehors des relations directes que j'ai eues avec les précédents acteurs, je suis reconnaissant à tous les auteurs auxquels j'ai emprunté et exploité des résultats de travaux dans différents domaines (tous cités en bibliographie). J'espère ne pas avoir trop déformé ou simplifié leurs idées. Le regretté Thérésien CADET est certainement un de ceux auxquels je dois le plus.

Table des matières

1 Introduction **23**

1.1 Résumé géographique de l'Île 23

1.1.1 Géologie 23

1.1.2 Climat 25

1.1.3 Orographie 25

1.1.4 Végétation 25

1.1.5 Sols 25

1.2 Approche méthodologique- les unités de milieu 30

1.3 Plan de l'étude 32

2 LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE **37**

2.1 Morpho structures générales 37

2.2 Le Piton des Neiges 38

2.2.1 Phase I 41

2.2.2 phase II 41

2.3 Le Piton de la Fournaise 49

2.3.1 Phase I 49

2.3.2 phase II 50

2.3.3 phase III 50

2.3.4 Phase IV 50

2.3.5 Phase V 51

2.3.6 Phase VI 51

2.3.7 Les pyroclastites 52

2.4 Les matériaux détritiques... 53

3 LE CONTEXTE CLIMATIQUE **55**

3.1 Les grands traits de la circulation atmosphérique . . . 57
3.2 Les pluies . . . 58
3.2.1 Typologie et classification des différents régimes de pluies . . . 58
3.2.2 Distributions régionales des moyennes annuelles . . . 59
3.3 Les températures . . . 74
3.3.1 Les températures moyennes . . . 74
3.3.2 Quelques cas particuliers . . . 76
3.4 Les vents . . . 76
3.4.1 Les alizés . . . 76
3.4.2 Les brises . . . 78
3.4.3 Le foehn . . . 78
3.4.4 Vitesses moyennes des vents non cycloniques . . . 78
3.5 L'ensoleillement . . . 79
3.5.1 L'ensoleillement annuel . . . 79
3.5.2 Les variations saisonnières . . . 81
3.6 Le rayonnement . . . 81
3.6.1 Le rayonnement net (RN) . . . 83
3.6.2 Le rayonnement global RG . . . 83
3.6.3 Le rayonnement terrestre Rt . . . 84
3.6.4 Le rayonnement atmosphérique Ra . . . 84
3.7 L'humidité relative . . . 85
3.8 Evapotranspiration . . . 88
3.8.1 Détermination de l'ETP . . . 88
3.8.2 l'ETP - TURC . . . 88
3.8.3 ETP-PENMAN . . . 93
3.8.4 L'évaporation en bac - classe a . . . 97
3.8.5 Comparaison des trois méthodes . . . 99
3.8.6 En conclusion demande et déficit climatiques . . . 99

4 LE CONTEXTE VÉGÉTAL 103

4.1 Impact de l'emprise humaine . . . 104
4.1.1 Début de l'occupation agricole des «Hauts» . . . 105

4.1.2 L'arrivée du géranium . . . 108
4.2 La série mégatherme semi-xérophile . . . 108
4.2.1 La savane littorale de basse altitude . . . 108
4.2.2 La forêt semi-xérophile de moyenne altitude (200-800 mètres) . . . 109
4.2.3 L'intervention de l'homme:cultures et végétation secondaire . . . 110
4.3 La série mégatherme hygrophile . . . 111
4.3.1 Localisation des reliques actuelles (1.989) . . . 113
4.3.2 Les principales espèces ligneuses . . . 114
4.4 La série mésotherme hygrophile . . . 115
4.4.1 La forêt complexe à «bois de couleur» . . . 115
4.4.2 Les fourrés très hygrophiles à Pandanus montanus . . . 116
4.4.3 La forêt à Acacia heterophylla . . . 116
4.5 L'étage oligotherme de haute altitude . . . 119
4.5.1 Les situations bien drainées mais non excessivement sèches . . . 119
4.5.2 Les situations écologiques particulières . . . 119
4.6 La végétation littorale . . . 120
4.6.1 La végétation d'extrême littoral . . . 120
4.6.2 La végétation des zones marécageuses . . . 121
4.7 La dynamique de colonisation des laves . . . 122
4.7.1 Dans le secteur «mégatherme humide»- Grand Brûlé) . . . 122
4.7.2 Dans le secteur mésotherme («grandes pentes» de la Fournaise) . . . 123
4.7.3 Variations en fonction de la nature des coulées . . . 124
4.8 La végétation secondaire et les «pestes» végétales . . . 124
4.8.1 Les «pestes» (envahisseurs biologiques) . . . 125
4.8.2 Autres espèces secondaires . . . 126
4.9 Sylviculture :les reboisements et «régénérations» . . . 129
4.9.1 Reboisements en espèces exotiques . . . 129
4.9.2 «Régénérations» d'espèces indigènes . . . 131

5 HAUTE ALTITUDE **133**

5.1 Milieux situés au-dessus de 2 500 mètres d'altitude . . . 133
5.1.1 Le climat . . . 134

5.1.2 La végétation . . . 134
5.1.3 Les matériaux superficiels et les sols . . . 134
5.2 Les planèzes situées entre 1 800 et 2 500 mètres d'altitude . . . 136
5.2.1 Les milieux à dalle dominante (unité 2) . . . 136
5.2.2 Les milieux à blocailles et cendres sur coulées (unité 3) . . . 137
5.2.3 Milieux à lapilli et cendres sur coulées (unité 4) . . . 138

6 MATÉRIAUX VOLCANIQUES EN PLACE DU PITON DES NEIGES 141

6.1 Les coulées de la phase II . . . 143
6.1.1 Les modelés de dissection très accidentés (unité 5) . . . 143
6.1.2 Les lambeaux de planèzes (unités 6 à 9) . . . 147
6.2 Les Tufs de Saint-Gilles (phase II) . . . 154
6.2.1 Relations géomorphologiques avec les autres types de formations . . . 154
6.2.2 Les croupes et versants pentus (unité 10) . . . 156
6.2.3 Les bas de versants (unité 11) . . . 158
6.2.4 Les gouttières colluviales (unité 12) . . . 159
6.3 Les coulées de la phase III . . . 160
6.3.1 Exposition «sous le vent» sols bruns et fersiallitiques unités 13, 14, 15) . . . 160
6.3.2 Exposition «au vent» sols ferrallitiques (unité 16) . . . 163
6.4 Les coulées de la phase IV . . . 164
6.4.1 Les zones de basse altitude «au vent» unités 17 et 18) . . . 164
6.4.2 Les zones de basse altitude «sous le vent» (unités 19 à 26) . . . 170
6.4.3 Les sols bruns non ferruginisés unités 19 et 20) . . . 171
6.4.4 Les sols bruns ferruginisés (unités 21, 22, 23) . . . 177
6.4.5 Les vertisols et affleurements de coulées (unités 25 et 26) . . . 180
6.5 Les pyroclastites, tufs et cendres;de la phase V (unités 27 à 39) Caractéristiques générales . . . 183
6.5.1 Etendue . . . 183
6.5.2 Caractéristiques des dépôts . . . 183
6.5.3 Zonation pédo-génétique :climato-séquence . . . 184
6.5.4 Les placages de tufs résiduels à sols bruns squelettiques (unité 27) . . . 189
6.5.5 Les sols bruns andiques (unités 27 et 29) . . . 189
6.5.6 Relations «modelé-matériaux superficiels» . . . 189

6.5.7 Description des sols 190
6.5.8 Variations autour du profil moyen 190
6.5.9 La pédogenèse 191
6.5.10 Utilisation agronomique 191
6.5.11 Les sols ferrallitiques andiques (unités 30 et 31) - Relations entre le modelé et les formations superficielles 193
6.5.12 Les sols 194
6.5.13 Les andosols désaturés non perhydratés (unités 32 et 33) 196
6.5.14 L'érosion «agricole» des andosols 237
6.5.15 Autres problèmes agronomiques 252
6.5.16 Les andosols désaturés perhydratés (unités 34 à 39) 259
6.5.17 Les andosols perhydratés modaux (unités 34 et 35) 259
6.6 Les coulées de la phase VI (unités 40 à 43) 282
6.6.1 Les coulées auto-bréchifiées de Saint André 282
6.6.2 Les coulées de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins 286
6.6.3 Des coulées autobréchifiées (unité 41) 286
6.6.4 Des coulées ignimbritiques (unités 43) 286
6.7 Les nuées ponceuses de la phase VI (unité 44) 287

7 MATÉRIAUX VOLCANIQUES EN PLACE DE LA FOURNAISE 289

7.1 Les coulées anciennes sans recouvrements cendreux 291
7.1.1 - Les sols 292
7.1.2 - Conséquences agronomiques 293
7.2 Les matelassages de cendres épais 293
7.2.1 Mise en place et nature des pyroclastites 294
7.2.2 Les sols :Les andosols désaturés non perhydratés (unité 46) 295
7.2.3 Les andosols désaturés perhydratés (unités 47 et 48) 296
7.2.4 Problèmes agronomiques 297
7.2.5 La canne à sucre 297
7.2.6 Les prairies 298
7.2.7 Les autres cultures 298
7.2.8 Les zones forestières actuelles 299
7.3 Les saupoudrages de cendres moyennement à peu épais 299

7.3.1 Le modelé . . . 300
7.3.2 Les sols . . . 301
7.3.3 Contraintes agronomiques . . . 301
7.4 Les coulées à piégeages de cendres peu épais . . . 303
7.4.1 Les régions «sous le vent» de basse altitude sans cendres (unités 51 et 52) :Localisation 303
7.4.2 Le modelé . . . 304
7.4.3 Les sols . . . 304
7.4.4 Qualités agronomiques . . . 304
7.4.5 Les régions d'exposition «intermédiaire» à moyenne et basse altitude sans cendres (unité 53) . . . 306
7.4.6 Les régions «au vent» à piégeages de cendres (unités 54 à 58) . . . 308
7.4.7 Les zones de haute altitude (unités 55 à. 58) . . . 311
7.5 Les recouvrements de lapilli . . . 314
7.5.1 Les lapilli de basse et moyenne altitude (unité 59) . . . 314
7.5.2 Les lapilli de haute altitude (unités 60 et 61) . . . 316
7.6 Les coulées récentes . . . 316
7.6.1 Les sols . . . 318
7.7 Les coulées sub-actuelles et actuelles . . . 318
7.7.1 L'édifice central (cône terminal) . . . 319
7.7.2 L'Enclos Fouqué . . . 319
7.7.3 Les Grandes Pentes et la Plaine des Osmondes . . . 319
7.7.4 Le Grand Brûlé . . . 320
7.7.5 Plaine des Sables, Hauts de la Rivière de l'Est . . . 320
7.7.6 Les coulées «hors caldera» . . . 321

8 «CIRQUES» 323

8.1 La formation des «cirques» . . . 323
8.2 Nature des matériaux des cirques . . . 326
8.3 Le modelé dans les cirques . . . 329
8.3.1 Les «îlets» (unités 68 à 77) . . . 329
8.4 La zonation climatique . . . 332
8.4.1 Le Cirque de Cilaos (tab. 8.2) . . . 332
8.4.2 Le cirque de Salazie . . . 333

8.5 Les sols des îlets . . . 333
8.6 Le cas des compartiments effondrés/glissés des flancs de bouclier . . . 335
8.7 L'érosion dite «géologique» dans les cirques . . . 336
8.8 L'agriculture dans les cirques - contraintes . . . 337
8.8.1 L'érosion dite «agricole» . . . 338

9 FORMATIONS SUPERFICIELLES 341
9.1 Les «alluvions à galets» des cônes de déjection . . . 341
9.1.1 Les alluvions anciennes unités 80 et 81) . . . 342
9.1.2 Les alluvions actuelles (unité 84) . . . 349
9.2 Les alluvions fines . . . 352
9.2.1 Les plaines d'ennoyage littorales (unités 85-86-88) . . . 352
9.2.2 Les plaines d'altitude à piégeage cendreux (unité 87) . . . 355
9.3 Les coulées boueuses «pâteuses» . . . 355
9.4 Les sables littoraux . . . 356

10 CONCLUSION 357

A Annexe 361
A.1 Photos . . . 361
A.1.1 LE DOMAINE FORESTIER . . . 361
A.1.2 LE DOMAINE DE HAUTE ALTITUDE . . . 368
A.1.3 LE LITTORAL OUEST . . . 374
A.1.4 LE LITTORAL OUEST . . . 380
A.1.5 LES HAUTS DE L'OUEST . . . 388
A.1.6 LES HAUTS DE L'OUEST . . . 396
A.1.7 LE SUD-OUEST . . . 404
A.1.8 LES HAUTS DU CENTRE . . . 410
A.1.9 LE NORD . . . 416
A.1.10 LES CIRQUES . . . 422
A.1.11 LE VOLCANISME ACTUEL . . . 428
A.2 Bibliographie sur la Réunion (1991) . . . 434
A.2.1 Géologie . . . 434

A.2.2 Pédologie 444
A.2.3 Hydrologie - Hydrogéologie 448
A.2.4 Climatologie Bioclimatologie 461
A.2.5 Végétation - Environnement 464
A.2.6 Agronomie - Milieu rural - excepté:phyto-pathologie, sélection variétale, zootechnie . 469
A.2.7 Andosols - Sols volcaniques - Produits ”amorphes” jusqu’en 1984) 478
A.2.8 Signification des sigles 505
A.3 index 506

Glossaire **515**

Liste des tableaux

2.1 Composition chimique moyenne des laves de l´île de la Réunion 49

2.2 Estimation de l'épaisseur des cendres et de la pierrosité des sols à la Fournaise en fonction des phases géologiques 52

3.1 Totaux annuels des 5 régimes de pluies en fonction de l'exposition (D'après R. ROBERT) . . 59

3.2 Records d'intensité d'averses en 30 minutes enregistrés sur 19 stations de l'île 70

3.3 Estimations statistiques des intensités maxima (mm/h) et fréquences de retour (années) des averses 71

3.4 Les températures en fonction de l'altitude 74

3.5 Vents moyens (km/j) pour 8 stations de l'île 79

3.6 Radiations maximales théoriques (cal/cm^2/j) et durée astronomique du jour (h) à la Réunion. . 89

4.1 Superficies des espaces naturels, agricoles et urbains 107

6.1 Granulométrie des andosols non perhydratés 205

6.2 Comparaison des humidités pondérales en fonction du H des andosols perhydratés et non perhydraltés. 205

6.3 Estimations des densités, porasités, indices des vides et d'humidités en fonction des pF, dans l'horizon B des andosols non perhydratés du Piton des Neiges 210

6.4 Caractères de la matière organique et valeurs des indices MWD, IE, S pour les principaux horizons des andasoLs cultivés sur cendres du Piton des Neiges 240

6.5 Valeurs des indices MWD et S en fonction de la dessiccation 241

6.6 Estimation quantitative des éléments totaux dans les andosols vers 1 mètre de profondeur . . . 267

6.7 Estimation des compositions minéralogiques des andosols sur cendres du Piton des neiges . . 267

7.1 Estimation de la composition chimique moyenne des cendres de la Fournaise 295

7.2 Estimation des gammes de pH et d'aluminium échangeable en fonction de l'altitude dans les sols perhydratés du massif de la Fournaise 296

8.1 Estimations de quelques paramètres climatiques des Ilets du cirque de Mafate 332

8.2 Estimations de quelques paramètres climatiques des îlets du cirque de Cilaos 333

8.3 Caractéristiques moyennes des sols bruns et andosols perhydratés des cirques 334

9.1 Caractéristiques moyennes comparées des sols peu évolués sur «alluvions à galets» des grands cônes de déjection de l'île. 348

9.2 Quelques caractéristiques des principaux torrents de la Réunion 352

9.3 Comparaison des granulométries et des Ph des sols d'alluvions des plaines d'ennoyage littorales 353

10.1 Superficies des unités de milieu 357

Table des figures

1.1 Les classes de pentes générales à la Réunion 24

1.2 Photo 33 :Hauts de l'ouest (1650 mètres d'altitude) andosol perhydraté podzolique à «mascareignite» (horizon clair supérieur). 26

1.3 Condensé schématique des principaux ensembles géomorphologiques des volcans-bouclier de la Réunion 28

1.4 Hypsométrie 29

1.5 Premier découpage hiérarchique du milieu physique. (Cadre de la légende de la carte au 1/50 000) 33

1.6 Toponymie physiographique. Noms des principaux lieux remarquables pour la description du milieu physique 35

2.1 Perspectives morpho - géologiques schématiques 39

2.2 Carte morpho - géologique Prise en compte et modifications des travaux de G. BILLARD (1.975), L. CHEVALLIER (1.979), P. BACHELERY (1.981). 40

2.3 photo 22 :**Ouest de l'île - Région de Grand-Fond Boucan-Canot** collines au premier plan et au fond :«tufs» de Saint-Gilles (phase II) ;au centre :coulée de vallée de la phase IV en inversion de relief au dessus de la gouttière de Boucan-Canot. Cultures irriguées par le Canal Prune (Ravine St-Gilles) arboriculture en terrasses sur sols bruns peu épais, maraichage sur sols vertiques dans la gouttière, canne et maraichage sur vertisols de la coulée de vallée 43

3.1 Altitude - Climat :coupe schématique de l'île (Saint Gilles - Saint Benoît) 56

3.2 Pluviométrie moyenne annuelle (en mm) période 1.958-1.980 60

3.3 Nombre de mois «peu pluvieux» (moins de 100 mm) Période 1.951 1.969 62

3.4 Nombre de mois «secs» (moins de 50 mm) Période 1.951 1.969 63

3.5 Directions dominantes et fréquences des cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'océan Indien d'après Malick et Mercusol 66

3.6 Graphe intensif durée - fréquence des averses (Bessette et Duret -1.987) 67

3.7 Hauteur de l'averse de 29 heures (période de retour 10 ans). (Étude des maxima annuels sur 70 stations de 1.952 à 1.980, ajustement à la loi de Cumbel)(D'après M. Duret -1.982) 69

3.8 Températures moyennes annuelles 72

3.9 Moyennes des températures minima absolus du mois le plus froid (15 juillet - 15 aout) 73

3.10 Estimation des températures moyennes mensuelles entre 1 000 m et 3 000 m d'altitude 75

3.11 Carte de la ventilation à la Réunion. Sur les roses des vents, ne sont indiquées que les directions où les observations sont supérieures à 5 % 77

3.12 Essai de cartographie de la distribution de l'ensoleillement moyen annuel à la Réunion 80

3.13 Essai de zonage du rayonnement solaire global à la Réunion (cal/cm^2 /jour d'après B. GENERE et R. NATIVEL -1.989) 82

3.14 estimation des moyennes annuelles d'humidité relative (%) 86

3.15 Estimation des moyennes des minima d'humidité relative (%) du mois le plus «sec» (aôut en général) 87

3.16 Distribution spatiale de l'ETP- TURC. Moyenne annuelle (mm)1.971-1.981(d'après Bargeas-1.984) 90

3.17 Variations mensuelles des moyennes d'ETP - TURC (1.984-1.986) en mm/j 92

3.18 Variations mensuelles des moyennes d'ETP- PENMAN (1.984 -1.986) en mm/j (d'après Généré -1.987) 95

3.19 Variations de lETP-PENMAN en janvier (max.) et en juin (min.) en fonction de l'altitude . . . 96

3.20 Variations mensuelles des moyennes d'évaporation Bac- classe A (1.980 - 1.986) en mm/j . . 98

3.21 Le déficit climatique annuel (mm) 100

4.1 Extension du «domaine» (superficie = 100 000 hectares) 106

4.2 Végétation naturelle primaire et secondaire et activites agricoles (d'après Th. Cadet) 112

4.3 Zones naturelles d'intérêts écologique, faunistique et floristique (Z.N.I.E.F.F.) en 1.989 127

4.4 Réserves et sites protégés, existant ou en projet (1.989) 128

4.5 Forêts :réalisations et projets en 1.989 (sources :ONF (A.3)) 130

5.1 Processus périglaciaires dans les couches cendreuses au-dessus de 2500 m d'altitude (Grand Benard) 135

6.1 Les Roches mères des sols du Piton des Neiges (Zones effondrées et de très haute altitude exclues) 142

6.2 Altésites, sols et colluvions suries reliefs de dissection du volcanisme ancien (phase II) à coulées «aa» 146

6.3 Profils transversaux comparés des reliefs de dissection. En haut :de planèzes anciennes à substrat non altéré;en bas :de planèzes plus récentes à substrat non altéré. 148

6.4 Toposéquence et morphodynamique en amont de !a falaise littorale sur basaltes anciens entre Saint Denis et la Possession 152

6.5 Coupe morpho pédologique schématique nord-sud dans le massif des «tufs de Saint-Gilles» . . 155

6.6 LOCALISATION DES AFFLEUREMENTS DE COULEES D'HAWAITES PORPHYROIDES DE LA PHASE III DU PITON DES NEIGES, NON RECOUVERTES DE CENDRES 161

6.7 INTERACTIONS ENTRE LES PROCESSUS D'ALTERATION DES MATERIAUX ET D'APLANISSEMENT DU MODELE DANS LE SYSTEME «CENDRES (25000 ANS) SUR COULEES PHASE IV (100 000 ANS)» 166

6.8 Essai Proctor sur sol ferrallitique de Sainte-Marie Multiplication de l'énergie unitaire simulée dune récolte mécanisée de canne (El à E8) 169

6.9 Toposéquence de paysages sur le versant ouest entre La-Saine-Les-Bains et Piton Maido . . . 185

6.10 Les grandes catégories de sols à caractères andiques sur cendres issues du Piton des Neiges . . 188

6.11 Composante des processus dynamiques discontinus «catastrophiques» en paroxisme cyclonique 198

6.12 Dynamique de creusement et de recul des «ravines» sur les flancs d'un volcan-bouclier sous climat à régime cyclonique 199

6.13 Courbes de litration d'un andosol (Trois-Bassins) dans des solutions d'électrolyte Estimation du ZPC 201

6.14 Courbes de fixation de phosphore de deux andosols (versant ouest) en milieu O,O1 M $CaCl$ (16 à 24 heures) Comparaison avec les courbes de référence de Churchman et Parfitt 203

6.15 Relation densité apparente- humidité pondérale à pH 1,7 (bonne corrélation pour les andosols de la Réunion). (D'après Browers et Fortier-1.988) 206

6.16 Evolutions simultanées des teneurs en eau pondérale (Wp %) et des densités apparentes (Da) au cours de la dessiccation (D'après Rosello) 207

6.17 Evolution de l'indice des vides au cours de la dessiccation (D'après Rosello - 1.984) 209

6.18 Distribution de l'espace poral d'un andosol de Trois-Bassins (10-40 cm) (D'après Broumers-1.987) 211

6.19 Courbes de retrait d'andosol de Trois-Bassins à 30 cm). Comparaison sur sol frais, sol séché à l'air et sol de surface (D'après M. Vaksmann 1.987) 213

6.20 Courbe de retrait sur échantillons non remaniés de l'horiron B (40-100 cm) des andosols en fonction de l'altitude (700 à 1 200 mètres). Toposéquence ouest du Piton des Neiges (D'après Vaksmann 1.987) 214

6.21 Retrait (relation Wp-1/da) sur un profil d'andosol de Trois-Bassins (100 mètres).(Echantillons non remaniés) 215

6.22 Allure des profils de densité apparente et d'humidité pondérale dans les andosols sur cendres du Piton des Neiges (D'après M. Vaksmann 1.987) 216

6.23 Conductivité hydraulique en fonction du potentiel capillaire sur un andosol de Trois-Bassins (95 cm) (D'après Jouve - 1.984 218

6.24 Emboîtement des structures dans les andosols désaturés de la Réunion D'après V Rosello 1984 222

6.25 Dynamiques simultanées de l'agrégation emboîtée, de son système poral et du vidage des pores au cours de la dessiccation. (D'après Rosello 1.984) 225

6.26 Influence de la dessiccation préalable sur la rétention de l'eau seuil de réversibilité (Andosol de Trois-Bassins - horizon B)(D'après S Perret 1.990) 227

6.27 Relation perméabilité à l'air (W)- taux d'air (Andosols de la Réunion)(D'après Brouwers et Fortier-1.985) 229

6.28 Relation perméabilité intrinsèque à l'air-pression exercée pour différents états hydriques initiaux. (Andosol de Trois Bassins 10 - 40 cm) (D'après Broumers et Fortier 1.985) 231

6.29 Relation densité apparente-pression exer- cée pour diffférents états hydriques initiaux (Andosol de Trois-Bassins 10-40 cm) D'après M. BROUWERS et M. FORTIER -I985- 233

6.30 Courbes Proctor sur la toposéquence de Bérive du sol brun (50 m) à landosol (800 m) (D'après Perret - 1.988) 235

6.31 lnfluence du séchage sur le comportement au compactage dynmnique test Proclor harizor:7 d'andasol de Trou-Bassins. (Daprès Perret-/990) 236

6.32 Agrégation et stabilité des agrégats histogrammes et courbes du cumul des refus, en blanc :tamisage par lavage simple, en noir :tamisage par lavage après ultra-sons (d'après F. Py et A. Ckariond ;1.989) 243

6.33 Schéma de la succession chronologique des processus de dégradation et d'érosion des andosols désaturés non perhydratés 245

6.34 Schéma d'aménagement d'une exploitation de 4 hectares 256

6.35 Position des andosols de la Réunion (horizon B) sur le diagramme de Casagrande 265

7.1 Les «roches mères» des sols du massif de la Fournaise. (Zones de très haute altitude exclues) . 290

8.1 Morphologie des cirques 325

8.2 Morphologie de l'îlet de cilaos. Série de compartiments étagés par affaissements multiples. Marches gauches, contremarches, cuvettes, «bad-lands» escarpées périphériques 330

9.1 Région de Saint Paul/ La Possession :esquisse geomorphologique 344

9.2 Le réseau hydrographique 350

9.3 Comparaison des surfaces et des débits spécifiques d'étiage des bassins versants des principaux cours d'eau de la Réunion 351

A.1 Photo 1 :**Hauts du Nord :** plaine des Fougères. Forêt hygrophile mésotherme à «bois de couleur». Nombreux épiphytes. 362

A.2 Photo 2 :**Hauts du Nord :** «Plaine des Chicots». Forêt hygrophile mésotherme à tamarins, calumets. Philippia et fougères arborescentes. 363

A.3 Photo 3 :**Hauts de Ste Marie/Ste Suzanne (nord de l'île) :** défrichement dans la forêt à jamrosats et à «bois de couleur». Andosols perhydratés, pentes fortes. 364

A.4 Photo 4 :Une des pestes les plus menaçantes pour la végétation naturelle la vigne marrone (Rubus alcafolius). 365

A.5 Photo 5 :**Hauts du Nord :** forêt à bois de couleur goyaviers et fougères arborescentes. 366

A.6 Photo 6 :**Est de l'île :Mare Longue** forêt hydrophile à «bois de couleur» desbas, riches en «petits nattes», «grands nattes» «bois maigre», «bois de fer blanc» «bois de cannelle», etc... . . 367

A.7 Photo 7 :**La «mer de nuage»** plafonnée ici vers 1600 mètres d'altitude. Ce plafond dépend de l'épaisseur de la couche d'alizés humides. Il explique un maximum pluviométrique sur les flancs externes situé entre 1400 et 1600 mètres d'altitude. Au dessus, la pluviosité diminue et l'ensoleillement remonte. 368

A.8 photo 8 :**Lande des Hautes altitudes (Plateau Langevin)** :lande à branles (Philippin, Stoebe...). Au loin :la Plaine des Cafres puis le Piton des Neiges et le Grand Bénard. 369

A.9 photo 9 :**Lande de haute altitude au Piton des Neiges** (Coteau Kerveguen), environ 2100 mètres d'altitude :dominance de branles (Philippin. Stoebe). Prairie altimontaine dans cuvette mal drainée, riche en graminées. 370

A.10 photo 10 :**Haute altitude - Massif de La Fournaise (Bellecombe)** :andosol podzolique sur cendres et lapilli. à litière très acide (Philippin). Horizon placique d'accumulation ferrugineuse au contact avec la coulée sous-jacente. 371

A.11 photo 11 :**Haute altitude - Plateau Langevin** figures pseudo-karstiques de dissolution du basalte par voie bio-chimique sous litière très acide issue de Philippia. Cannelures et vasques (lapiez) visibles après l'érosion de la litière sur lapilli. 372

A.12 photo 12 :**Très haute altitude (plus de 2500 mètres)** perhydratation dans un andosol sur cendres, causant localement des glissements et reptations par gélifluxion. 373

A.13 photo 13 :**Ouest de l'île** :cône de déjection de la Rivière des Galets. Ville du Port. A gauche, l'Etang de St-Paul. 374

A.14 photo 14 :**Région Ouest - Etang de St-Paul** :végétation sub-aquatique riche en Papyrus (Ilots ronds) et Typha. Au fond, ancienne falaise littorale nappée de coulées des phases III et IV. Au-dessus, en fourré semi-xérophile, sols bruns ferruginisés peu épais. La canne ne commence que vers 300 mètres (au loin) sur sols bruns plus épais. Sans irrigation, fort déficit hydrique. 375

A.15 photo 15 :**Cirque de Mafate, près de la sortie** :à gauche. Rivière des Galets. A droite, vaste affaissement (Ilet Cambour). Au fond. crête d'Aurère et crête de La Marianne. 376

A.16 photo 16 :**Ouest de l'île** :plantation de savanna, installée sur terrasse ancienne de coulée boueuse, à sols bruns vertiques. Grandes parcelles séparées par les andains d'épierrage. Irrigation au goutte à goutte. Au fond, coulées des phases IlI et IV fossilisant une ancienne falaise littorale. 377

A.17 photo 17 :**Les planèzes de la zone sèche de l'île**.De gauche à droite :bande littorale à pentes faibles à Heteropogon - pierriers et vertisols, - escarpement tectonique (fin de la phase II) moulé par les coulées des phases III et IV, à fourré semi-xérophile - sols bruns ferruginisés, - «plateau» incliné bosselé cultivé en canne à sucre sans irrigation (fort déficit hydrique) - sols bruns. . . . 378

A.18 photo 18 :**Basses pentes du littoral ouest** :savanne herbeuse sema-aride à Heteropogon sur pierriers de coulées affleurantes (phase IV) ;rares poches de vertisols. 379

A.19 photo 19 :**Les basses pentes de l'ouest semi-aride** ravine des Trois-Bassins. Savanne herbeuse sèche à Heteropogon puis escarpement tectonique à fourré semi-xérophile (Leucaena, Phitecellobium, Albizia, Schinus, Dichrostachys). 381

A.20 photo 20 :**Basses pentes de l'ouest (Bois de Nèfles)** épierrages grossiers sur sols bruns et mise en andains. 382

A.21 photo 21 :**Littoral ouest (Pointe des Chateaux)** sol fersiallitique brun-rouge à tendance vertique sur coulées ˚ pahoehoe de la phase III (roche pintade). 383

A.22 photo 22 :**Ouest de l'île - Région de Grand-Fond Boucan-Canot** collines au premier plan et au fond :«tufs» de Saint-Gilles (phase II) ;au centre :coulée de vallée de la phase IV en inversion de relief au dessus de la gouttière de Boucan-Canot. Cultures irriguées par le Canal Prune (Ravine St-Gilles) arboriculture en terrasses sur sols bruns peu épais, maraichage sur sols vertiques dans la gouttière, canne et maraichage sur vertisols de la coulée de vallée 384

A.23 photo 23 **Ouest de l'île - Région de Piton St-Leu** :épierrage grossier au bulldozer. Rippers de deroctage à l'arrière. Rateau «Fleco» à l'avant pour mise en andains. 385

A.24 photo 24 **Région ouest sub-littoramle (aval de Piton St-Leu** :zone récemment défrichée et épierrée sur sols fersiallitiques (coulées de phase III). Semis de haricots sous plastique dans le sens de la pente (environ 12%). Irrigation au goutte à goutte. Risques importants d'érosion sur sol non couvert 386

A.25 photo 25 **Littoral ouest (entre St-Leu et Etang Salé)** :vertisol sur coulées de la phase IV . . . 387

A.26 photo 26 :**Ouest de l'île, structure des propriétés** lanières étroites séparées par des ravines. Héritage de la Compagnie des Indes (concessions «du Battant des lames au sommet des Montagnes»). 389

A.27 photo 27 :**Hauts de l'Ouest (vers 1400 mètres d'altitude)** prairies à kikuyu sur andosols perhydratés, installées sur vieilles jachères à Acacia decurrens. 390

A.28 photo 28 :**Zone ouest vers 800 mètres d'altitude** andosol non perhydraté sur cendres du Piton des Neiges. 391

A.29 photo 29 :**Moyennes pentes de l'Ouest** :récolte mécanique de la canne à sucre sur pentes de 10 %. Au-delà de 12 %, le tracteur et sa remorque pour le chargement ne passent plus. 392

A.30 photo 30 :**Versant Ouest de l'Ile** :la Grande Ravine (près de Trois-Bassins). De part et d'autre, champs de canne sur sols bruns, bruns andiques puis andosols (de gauche à droite). 393

A.31 photo 31 :**Hauts de l'Ouest (vers 900 mètres d'altitude)** :limite supérieure de la canne, début du géranium. Plantations en lignes et cordons anti-érosifs à canne fourragère. 394

A.32 photo 32 :**Hauts de l'Ouest (1100 mètres)** :cultures associées intercalaires (maïs, géranium, haricot), sur andosol non perhydraté. 395

A.33 photo 33 :**Hauts de l'ouest (1650 mètres d'altitude)** andosol perhydraté podzolique à «mascareignite» (horizon clair supérieur). 397

A.34 photo 34 :**Hauts de l'Ouest (1600 mètres d'altitude)** défrichement sur andosols perhydratés podzoliques à «mascareignite», pour l'installation de prairies. Sol extrêmement acide et érodible. 398

A.35 photo 35 :**Hauts de l'Ouest :**chaulage sur andosols perhydratés, avant l'installation de prairies. 399

A.36 photo 36 :**Hauts de l'Ouest (1600 mètres d'altitude)** :litage de pyroclastites (cendres et tufs) du Piton des Neiges (phase V). 400

A.37 photo 37 :**Hauts de l'Ouest - Zone «géranium»** :plantation traditionnelle clairsemée sur pentes fortes exposées à l'érosion. Au fond, ancienne jachère à Acacia decurrens. 401

A.38 photo 38 :**Hauts de l'Ouest - Zone «géranium»** :érosion sur andosol excessivement travaillé ;décollement et départ de l'horizon travaillé au dessus du «B» non travaillé (discontinuité). 402

A.39 photo 39 :**Hauts de l'Ouest - Région de Trois Bassins** :géranium planté en ligne, avec cordons anti-érosifs à canne fourragère. 403

A.40 photo 40 :**Sud Ouest de l'île**, La plaine du Gol :plaine fluvio-marine à alluvions argileuses, isolée de la mer par un cordon sableux (au premier plan). 404

A.41 photo 41 :**Sud de la Plaine des Makes (sud-ouest de l'île)** :à gauche, reliefs très disséqués dans la phase II du Piton des Neiges (massif du Bras de la Ravine Goyave). Au premier plan et à droite :planèzes des phases III et IV dévalant vers la mer après avoir fossilisé l'effondrement de la Plaine des Makes. 405

A.42 photo 42 :**Sud-Ouest de l'Ile** :Au fond, reliefs de dissection dans la phase II du Piton des Neiges (Massifs du Zèbre et du Dimitile). Au premier plan, amont de la plaine de l'Entre-Deux :gouttières d'effondrement/glissement à matériaux détritiques. Région agricole diversifiée (canne, légumes, arboriculture, jardins floraux...; 406

A.43 photo 43 :**Littoral Sud-Ouest - Région de Ligne Paradis** :Sol brun peu épais très caillouteux sur coulées en «gratons» de la phase IV du Piton de la Fournaise. 407

A.44 photo 44 :**Sud-Ouest de l'Ile, entre Les Avirons et Etang-Salé** :vergers (cocotiers et manguiers) irrigués au goutte à goutte, sur sables éoliens basaltiques (plaqués sur coulées de phase III du Piton des Neiges). 408

A.45 photo 45 :**Sud-Est de l'Ile :région agricole diversifiée** (maraîchage, canne, arboriculture). Au premier plan, flac est du Rosile, à andosols vitriques chromioques sur lapilli. 409

A.46 photo 46 :**Centre de l'île - Région de Piton Hyacinthe** :zone de maraichage intensif sur andosols perhydratés vers 1000 mètres d'altitude. 410

A.47 photo 47 :**Région Sud-Ouest, Hauts du Tampon** :pâturage sur andosols perhydratés (sur cendres du Piton des Neiges). Topographie bosselée caractéristique des coulées de laves, moulées par les pyroclastites épaisses. 411

A.48 photo 48 :**Hauts de La Plaine des Cafres** :prairies sur piégeages cendreux à andosols perhydratés, entre les affleurements de coulées en «gratons» de la phase IV de La Fournaise. Au fond, versants de la phase I à manteau cendreux plus épais. 412

A.49 photo 49 :**Versants Ouest du Massif de La Fournaise** :phase I (à recouvrements cendreux du Piton des Neiges) fortement disséquée et Plaine des Cafres (phase IV de La Fournaise à saupoudrage cendreux peu épais), non entaillée. 413

A.50 photo 50 :**Plaine des Palmistes** :fourré hygrophile à Pandanus montanus, Machaerina iridifolia («herbe sabré»), fougères aquatiques, etc... Andosol perhydraté hydromorphe sur cendres de La Fournaise à substrat peu perméable (dalle «pahoehoe»). 414

A.51 photo 51 :**Sud de l'île - Plateau de Grand-Coude** :basaltes de la phase 2 de La Fournaise matelassés de cendres du Piton des Neiges. Andosols perhydratés. Zones consacrées aux prairies (1200 mètres d'altitude). Au fond, Ravine de la Rivière des Remparts. 415

A.52 photo 52 :**Les planèzes du flanc Nord du Piton des Neiges** (Hauts de Ste-Marie/ Ste-Suzanne) :dissection en lanières étroites par des ravines sub-parallèles. Topographie bosselée à recouvrement cendreux (andosols). Canne à sucre jusque vers 600 mètres. Forêt secondaire à goyaviers et jamrosats, puis forêt hygrophile mésotherme à «bois de couleur» au dessus (mitée par des prairies récemment installées). 416

A.53 photo 53 :**Nord de l'île - Région de Ravine des Chèvres** :grandes exploitations sucrières sur «terres franches» (sols ferrallitiques et ferrallitiques andiques). Pentes faibles et dissection peu serrée. 417

A.54 photo 54 :**Nord de l'île, St-Denis**, route de ONFA.3 :altérites et sol ferrallitique sur basalte de la phase II du Piton des Neiges. Altération en «pelures d'oignon». 418

A.55 photo 55 :**Nord de l'île - Rivière des Pluies** :radier emporté par la crue lors du cyclone Hyacinthe (janvier 1980). 419

A.56 photo 56 :**profil typique d'une ravine** creusée dans les coulées de la phase IV du Piton des Neiges. Succession de replats, escarpements et vasques (bassins). 420

A.57 photo 57 :**Nord-Nord-Est de l'île :rivière du Mât** à sa sortie du Cirque de Salazie (au fond). A gauche :reliefs de dissection dans la phase II du Piton des Neiges (Morne du Bras des Lianes). Au centre et à droite :coulées terminales du Piton des Neiges (phase VI), sans recouvrement cendreux. Au centre-droit :la Ravine Sèche scellée par une coulée de vallée de la phase VI. . . 421

A.58 photo 58 :**Cirque de Cilaos vu du Sommet du Piton des Neiges** - en bas :Ilets du Petit Matarum, du Grand Matarum, de Cilaos, de Mare à Joseph, de Bras-Sec. - à gauche :le coteau Kerveguen (2ème caldera du Piton des Neiges) et son Rempart (Coteau Maigre). 422

A.59 photo 59 :**Cirque de Cilaos - Ilet à Cordes** :au loin, le Piton des Neiges champ de lentilles entièrement manuel entre les pierres. 423

A.60 photo 60 :**Cirque de Salazie** :coulée boueuse de janvier 1980 (cyclone Hyacinthe) sur les flancs de Grand-Ilet. Elle a été favorisée par les pendages «aval» des matériaux. Il y a eu 10 morts. . 424

A.61 photo 61 :**Cirque de Salazie**, près de Grand-Ilet :Travaux de RTM, réalisés par l'ONF. Essai de stabilisation des ravinements par construction de fascines et reboisement. 425

A.62 photo 62 :**Cirque de Cilaos :Pointe de l'îlet de Mare Sèche**. Ravinement intense dans les matériaux disloqués et les matériaux détritiques. 426

A.63 photo 63 :**Cirque de Mafate vu du Maïdo** :flets de La Plaine aux Sables, de Marla et de Kelval, étagés en gradins. Ravinement intense dans les matériaux disloqués, broyés et zéolitisés et dans les matériaux détritiques. Au fond, la crête du Taïbit, séparant les cirques de Mafate et Cilaos. 427

A.64 photo 64 :**Le Piton de La Fournaise** :à partir du premier plan :le Cratère Dolomieu, le Cratère Bory, l'Enclos Fouqué (dernière caldéra), le Rempart de Bellecombe, la Plaine des Sables (2ème caldéra), le Rempart des Sables. Au loin, le Massif du Piton des Neiges. 428

A.65 photo 65 :**Est de l'île :les Grandes Pentes** (au loin) et le Grand Brûlé (au premier plan) du Massif de La Fournaise. A gauche, rempart du Tremblet limitant au sud la caldéra. En noir :coulées de moins de 10 ans ;au loin en blanc (lichens) coulées de 10 à 30 ans ;au premier plan en vert (fourrés d'arbustes pionniers, de fougères et d'espèces secondaires) :coulées de plus de 30 ans. 429

A.66 photo 66 :**Piton de La Fournaise** :l'éruption de 1988 dans l'Enclos Fouqué. 430

A.67 photo 67 :**Grandes Pentes de La Fournaise** :coulées de moins de 30 ans couvertes d'un épais manchon de lichens (Stereocaulon vulcani). 431

A.68 photo 68 :**Est de l'île** :coulées de 1977, hors Enclos, vers Piton Ste-Rose ;sorties effusives sans cônes de projections, à travers la forêt hygrophile de «bois de couleur». 432

A.69 photo 69 :**Est de l'île, Région de Piton Ste-Rose** :coulée de 1977 de type «aa», ayant atteint la mer. 433

Chapitre 1

Introduction

1.1 Résumé géographique de l'Île

La Réunion est une île volcanique située dans l'Océan Indien 800 kilomètres à l'Est de Madagascar, par 55 ˚ 30' de longitude est et 21 ˚ 05' de latitude sud.

Elle possède une superficie de 2 510 km^2 et une forme générale ovoïde (petit axe 45 km, grand axe 72 km). Très montagneuse, elle culmine à 3 069 mètres au Piton des Neiges.

Ancienne «colonie», la Réunion est devenue département français en 1.946. Sa population actuelle est d'environ 540 000 habitants répartis sur la moitié de la superficie, l'autre moitié étant inhabitée.

Peuplée depuis 1 643, son histoire - colonisation, esclavage puis embauche «d'engagés» et immigration spontanée - en a fait une société créole à mélange ethnique et racial exceptionnel : blancs d'origine, malgaches, africains («Cafres»), indiens musulmans («Z'arabes»), tamouls («Malabars»), chinois, auxquels se mêlent les «métro» («Z'oreils»). Le métissage est élevé entre ces diverses «souches».

Le chef-lieu du département est Saint-Denis (110 000 habitants). Il y a 4 arrondissements dont les chef-lieux (sous-préfectures) sont : Saint-Denis, Saint-Pierre, Saint-Paul, Saint-Benoît. Il y a 24 communes (Maires), 36 cantons (élisant les Conseillers Généraux) et 5 circonscriptions législatives (élisant les Députés).

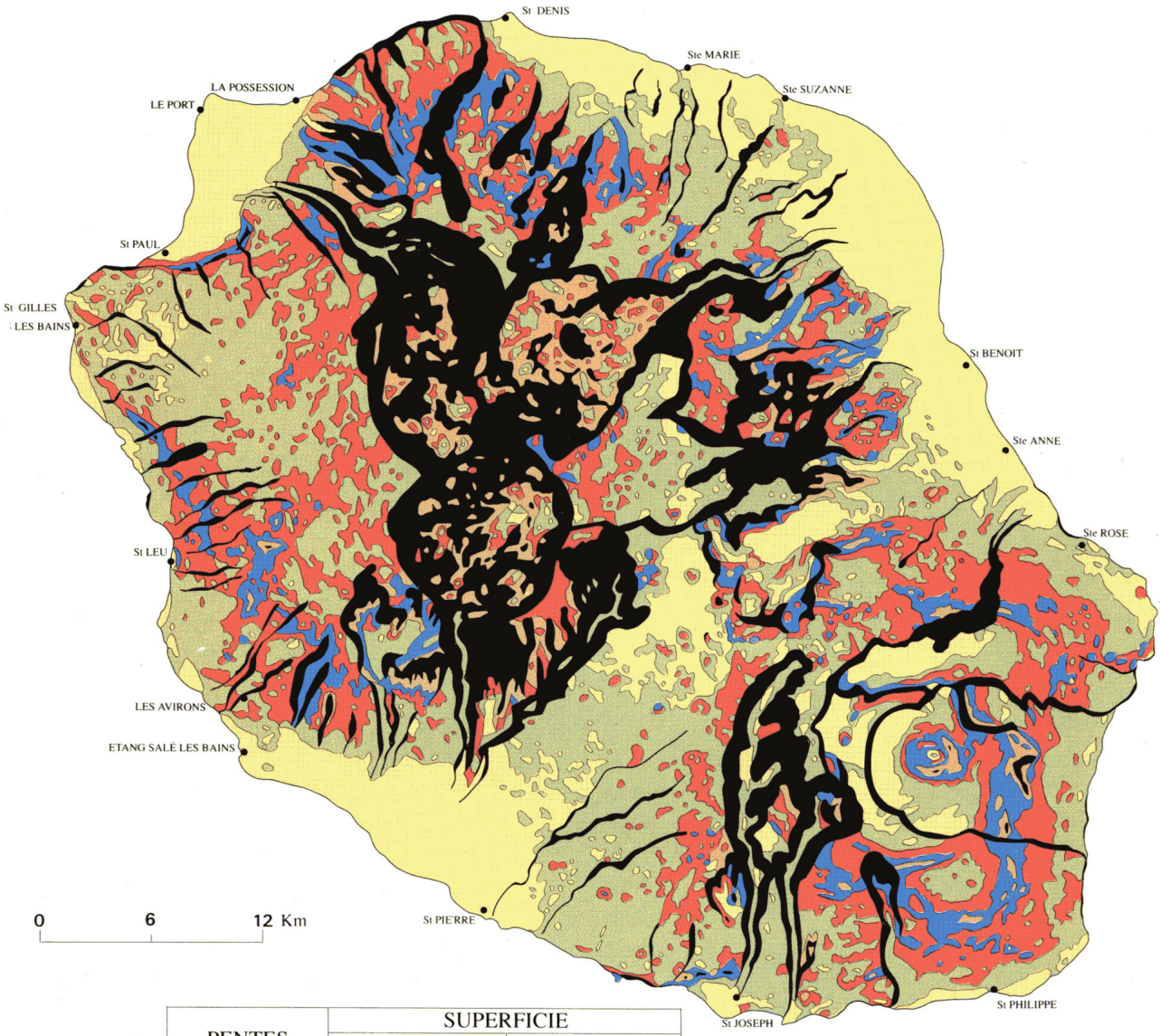
Depuis 1.982, l'île possède deux collectivités locales décentralisées élues : le Département (Conseil Général) et la Région (Conseil Régional), qui, avec l'État, se partagent la «gestion» le l'île.

Émergée il y a 3 millions d'années, la Réunion est un édifice volcanique de type «bouclier intra-plaque» («hot point») juxtaposant (Fig. 2.1) un massif «ancien» (Piton des Neiges) et un massif récent/actuel (la Fournaise). Elle présente une géographie physique extrêmement contrastée, des points de vue géologique, climatique, orographique, végétal et par conséquent pédologique.

1.1.1 Géologie

- La géologie est elle-même diversifiée concernant tant la chimie des laves que leurs types d'émission et leur chronologie. En effet, la gamme pétrographique des laves (alcalines) s'étend des océanites (basaltes très riches en olivine) jusqu'aux trachytes (laves «acides» à plus de 60 % de SiO_2) en passant par les andésites. Bien que le volcanisme soit à dominance effusive (coulées «aa», «pahoehoe», autobrèchifiées), de nombreux et vastes épisodes explosifs, pyroclastiques se sont intercalés, qu'ils soient de type «sec» (lapilli, cendres), de type «phréato-magmatique» (cendres, certains tufs) ou de type «nuée» (ignimbrites, ponces, tufs soudés). Les âges des laves s'étalent suivant des épisodes assez bien délimités (notamment par des périodes d'altération, des mouvements tectoniques ou des phases de saupoudrage cendreux) depuis 3 millions d'années jusqu'à l'actuel.

FIG. 1.1 – *Les classes de pentes générales à la Réunion*



	PENTES	SUPERFICIE	
		%	Km²
	plus de 50 %	18, 2	460
	40 - 50 %	3, 9	100
	30 - 40 %	7, 7	191
	20 - 30 %	17, 5	440
	10 - 20 %	30, 7	764
	0 - 10 %	22, 0	557
	Total	100	2512

(.jpg)

1.1.2 Climat

Le climat est marqué par :

- de très forts gradients de pluviosité, depuis 600 mm jusqu'à 9 000 mm (Fig. 3.2), conditionnés par l'exposition aux alizés (face «au vent», face «sous le vent»), l'altitude et l'orographie très accentuée,
- des périodes cycloniques violentes et souvent destructrices (photo A.55 et A.60),
- un fort gradient de température lié étroitement à l'altitude.

1.1.3 Orographie

Du point de vue orographique : l'île est «compacte» et fortement accidentée (Fig.1.1 et 1.4) puisque, pour un diamètre moyen de 60 kilomètres, le point culminant central (Piton des Neiges) se situe à 3 069 mètres d'altitude. La dissection est très active, aussi bien sur les versants «externes» que dans le coeur du massif. Les flancs externes du volcan-bouclier sont découpés par des entailles profondes («ravines») isolant de grands panneaux de types «planèzes», à formes triangulaires (pointes vers le haut) ou en lanières étroites (photos A.17 et A.52), dont les pentes s'atténuent et se concavisent dans leurs parties basses terminales (Fig. 1.3). Le centre du vieux massif, quant à lui, est profondément éventré par de spectaculaires «cirques» coalescents entourés de «remparts» sub-verticaux de 500 à 1 000 mètres de dénivelées. L'érosion très active, en bad-lands (photos A.52 et A.53) et en coulées boueuses, aidée par la tectonique tardive y évacue actuellement vers la mer, spécialement en périodes cycloniques, des quantités impressionnantes de matériaux. Ce sont construits en aval de vastes cônes de déjection à gros galets (photo A.13) avec terrasses emboîtées d'âges différents. Quant au massif récent (la Fournaise), sa morphologie est marquée par des formes volcano-tectoniques fraîches encore peu disséquées et peu altérées.

1.1.4 Végétation

La végétation est également bien différenciée et zonée grossièrement en ceintures sub-circulaires (Fig. 4.2) s'étageant en fonction de l'altitude et de l'exposition. Les extrêmes étant, d'une part la savane semi-aride du littoral Ouest (photo A.18), d'autre part, la lande éricoïde (photo A.8) de haute altitude (plus de 1 800 mètres). Au-dessus (600 mètres) de la «ceinture sucrière» qui entoure l'île s'étendent dans l'ouest des cultures de géranium et des cultures vivrières et maraîchères auxquelles succèdent des pâturages. Au delà (700 mètres dans l'est, 1 600 mètres dans l'ouest), s'étend la végétation forestière naturelle commençant souvent par une bande de forêt secondaire à espèces introduites (goyavier, jamrose...), passant ensuite à la forêt primitive (non «polluée») à «bois de couleur», de type mégatherme puis mésotherme (photos A.1, A.5 et A.6). L'étage à Tamarins (Acacia heterophylla) est très spécifique à la Réunion, à partir de 1 500 jusqu'à 1 800 mètres d'altitude ; il précède les landes de l'étage supérieur. Les coulées subactuelles et actuelles de la Fournaise ne portent le plus souvent qu'une végétation pionnière à base de lichens et de fougères.

1.1.5 Sols

La nature et la répartition des sols sont les résultantes des interactions et recoupements de toutes les composantes précédentes. Voici brièvement quelques «clés» de distribution:

- Forte pluviosité - âge ancien et températures chaudes favorisent l'hydrolyse poussée des minéraux des roches et donc la pédogenèse ferrallitique. C'est donc sur les roches des épisodes volcaniques anciens (plus de 75 000 ans en moyenne) exposées «au vent», à basse et moyenne altitude, que l'on trouve les sols les plus anciens, de nature ferrallitique, à condition toutefois que la dissection, qui a eu le temps de faire son oeuvre, n'ait pas tout décapé. En conséquence, les planèzes ferrallitisées bien conservées

FIG. 1.2 – *Photo 33 : Hauts de l'ouest (1650 mètres d'altitude) andosol perhydraté podzolique à «mascareignite» (horizon clair supérieur).*

(.jpg)

sont d'autant plus restreintes qu'elles sont anciennes (Fig. 1.3). Autrement dit, les sols fortement ferrallitiques peu tronqués sur volcanisme très ancien (plus de 200 000 ans) sont peu répandus, alors que les sols faiblement à moyennement ferrallitiques sur planèzes moins «anciennes» (75 000 à 200 000 ans) sont davantage représentés car moins touchés par l'érosion (mais toutefois suffisamment pour que les recouvrements cendreux postérieurs aient disparu).

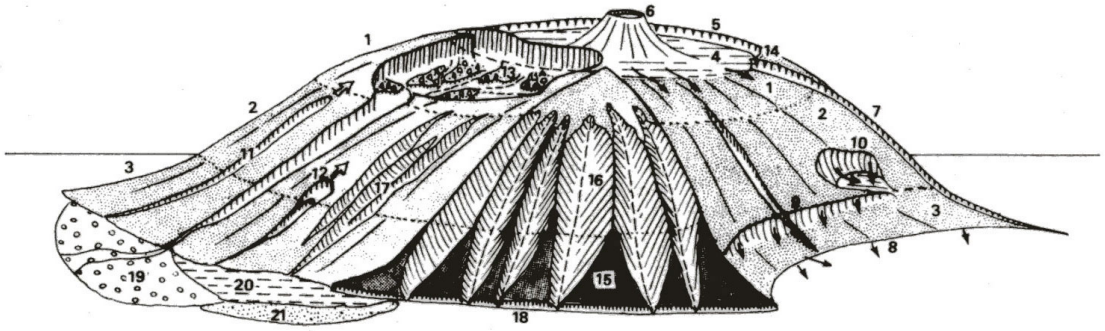
– L'existence d'un matelas de pyroclastites cendro-tuffeuses récent (15 000 - 40 000 ans) ayant recouvert la majeure partie (Fig. 6.10) du massif dit «ancien» (à l'exception de ses coulées terminales) et une partie de la Fournaise, conditionne, de façon fondamentale (lorsque ce dépôt n'a pas été éliminé), la zonation des sols. Cette zonation est dans ce cas, déterminée uniquement par l'exposition (nombre de mois de saison sèche, pluviosité) et l'altitude. C'est sur des cendres que se sont formés la majorité des andosols de l'île.

  Le versant ouest montre une différenciation, liée au climat et à l'altitude, très nette (Fig. 6.9) : sols bruns andiques de 350 à 600 mètres, andosols désaturés non perhydratés de 600 à 1 300 mètres, andosols désaturés perhydratés de 1 300 à 1 600 mètres, andosols désaturés podzoliques de 1 600 à 1 800 mètres ; au-delà de 1 800 mètres, andosols vitriques ou podzoliques peu épais (placages de cendres et lapilli en grande partie décapés, sous landes à bruyères). Dans la gamme des andosols perhydratés existent des variétés régionales telles que les sols à «avoune» (à épaisse litière acide semi-tourbeuse sous végétation forestière riche en bruyères), les sols à «mascareignite» à horizon supérieur de couleur cendreuse (voir photo A.33) composé exclusivement de phytolites d'opale d'origine biologique, les perhydratés hydromorphes à plancher sub-aliotique (ou «placique») continu (Plaine des Palmistes).

- Dans les zones à longue saison sèche (sous le vent) et à végétation peu couvrante, de moyenne et basse altitude, dans le prolongement aval de la séquence précédente (en dessous de 400 mètres d'altitude), alors que la couverture pyroclastique récente a été éliminée par l'érosion, on sort du domaine des andosols pour arriver à une association plus «classique» (Fig. 6.9) : sols bruns, sols bruns vertiques, vertisols, sols lithiques d'érosion. C'est cette gamme de sols, à laquelle s'ajoutent des sols bruns andiques à la limite supérieure, qui est destinée à être irriguée sur la façade ouest, lorsque le réseau de captage et d'amenée des eaux des cirques sera terminé.
- Tous les épisodes volcaniques postérieurs à l'épisode pyroclastique (cendres à tendance trachytique) majeur du Piton des Neiges se reconnaissent à leur faible altération et à la quasi-absence de recouvrements cendreux donc à une surface rocailleuse plus difficile à cultiver («gratons» de coulées «aa» ou autobréchifiées le plus souvent). Ce critère (absence ou présence de pyroclastites du Piton des Neiges), qu'il faut néanmoins utiliser avec prudence surtout quand on se rapproche de la Fournaise, a servi dans certains cas à identifier et à dater de façon relative les coulées récentes les unes par rapport aux autres. C'est ainsi que certaines coulées du Piton des Neiges situées en amont de Saint-André et de Saint-Benoît paraissent extrêmement récentes.

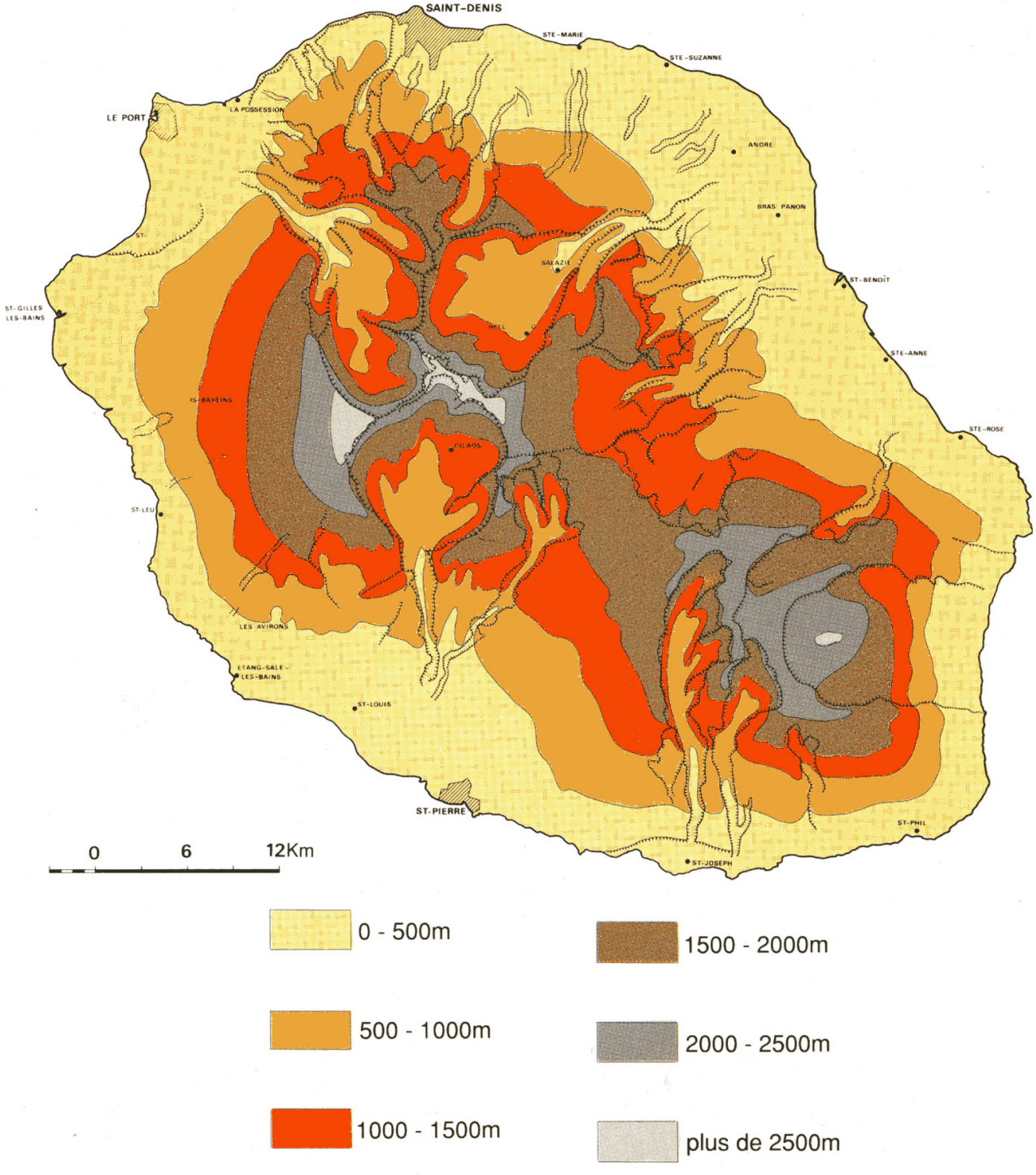
  De même pour la Fournaise, qui a également émis de son côté des cendres (de nature basaltique cette fois) en plusieurs phases, l'épaisseur de ces cendres, qui conditionne la qualité des sols, est en général d'autant plus faible que le volcanisme est plus récent.

FIG. 1.3 – *Condensé schématique des principaux ensembles géomorphologiques des volcans-bouclier de la Réunion*



1/ Convexité sommitale du bouclier (ex : Coteau Kerveguen, Plaine des Chicots, Plaine des lianes, Plaine des Fougères, Brûlé de Saint-Leu, Notre Dame de la Paix, Plaine des Remparts...)
2/ Flancs pentus du bouclier (ex : Hauts de l'ouest, Hauts de Ste Marie, Fôret Mourouvin, les Grandes Pentes de la Fournaise.)
3/ Concavité Basale du Bouclier (ex : Bagatelle, Beaufond, Bois Rouge, Mas des chevrettes, Commune Caron, Planèzes semi-arides de l'ouest, Grand-brulé...)
4/ Caldera (ex : Enclos Fouqué, Plaine des Sables, Bebour-Bélouve)
5/ Rempart de Caldera (ex : Rempart de Bellecombe, Rempart des Sables Coteau Maigre, Coteau Mazerin).
6/ Edifice Central (ex : Piton des Neiges, Bory-Dolomieu)
7/ Rempart de glissement/effondrement du flanc du Bouclier (ex : Rempart du Tremblet, Rempart de Bois Blanc, Ravine Constantin, Rempart de Basse vallée).
8/ Cote à «Rentrant» concave de glissement et plongée en mer d'un panneau du Bouclier (ex : Golfes de Saint-Philippe, de Saint-Leu, de Saint-Paul).
9/ Escarpement morphotectonique d'effondrement d'un panneau du Bouclier parallèlement à la cote (ex : Rampes de Colimaçons, Rampes de Saint-Paul, Pentes Mangue).
10/ Plaine d'effondrement/glissement «perchée», sur le flanc du Bouclier (ex : Dos d'Ane,Tevelave, Plaine des Makes, Entre-Deux, Plaine des Grègues..)
11/ Ravines à «Bords Rigides» des flancs de Bouclier.
12/ Amphithéâtre de reculée de ravine (ex : Grande Ravine, Ravine du Chaudron...)
13/ Cirque = vaste excavation piriforme du sommet du Bouclier. Phénomènes d'effondrements morpho-tectoniques, de capture par une, ravine de déblaiement fluviatile (ex : Cirques de Cilaos, Salazie, Mafate, Bras des Roches Noires, Grand Bassin, amont de la Rivière des Pluies, Grand Pays...)
14/ Nez (Coupé) : Promontoire triangulaire pointu et escarpé : recoupement de deux remparts (ex : Nez de Boeuf, Grand Benard, Nez coupé du Tremblet, Mazerin...)
15/ Planèzes résiduelles triangulaires de coulées anciennes (ex : La Montagne, Brûlé de Saint-Denis, Saint-Francois, le Maniron...)
16/Reliefs de dissection très montagneux à longues crêtes étroites sur volcanisme altéré ancien (ex : la Grande Montagne, Massif des Patates à Durand, Eden, Cratère, Dimitile Maniron, Sans-Soucis...)
17/ Boutonnière sur les flancs du Bouclier dans volcanisme ancien altéré, après percement des coulées «Rigides» plus récentes (ex : Massifs du Grand Figuier, du Bras Mussard, du Grand Bras Sec...)
18/ Falaise littorale (ex : Falaises de Saint-Denis/la Possession)
19/ Cône de déjection à Galets (ex : Rivières des Galets, St Etienne, du Mat, de l'Est...)
20/ Plaine littorale de décantation : Angle mort de cône de déjection, isolation de la mer par un cordon littoral (ex : Etangde St Paul, Gol, Plaine de Ste Suzanne).
21/ Cordon littoral fluvio-marin (Galets) ou Marin Eolien (Sables) (ex : St Paul, Etang-Salé, Bois Rouge).

FIG. 1.4 – *Hypsométrie*



(.jpg)

1.2 Approche méthodologique- les unités de milieu

Cet essai n'est pas une étude pédologique classique, tout comme la carte annexée n'est pas une carte des sols au sens restreint du terme. C'est une carte des «unités de milieu».

Mais qu'entend-on par unité de milieu ?

En termes théoriques, on peut dire qu'une «unité de milieu» est une classe d'objets naturels, relativement homogène à l'échelle de perception et de représentation spatiale considérées (ici, le 1/50 000), possédant une cohérence qui résulte d'interactions spécifiques entre les diverses composantes de la nature (matériau, climat, modelé, sols, végétation, circuits des eaux...).

Plus concrètement, une unité de milieu (représentée par un ensemble de «patates» de couleur identique sur la carte) est définie par un matériau donné, soumis à un climat donné, affecté d'un modelé particulier, sur lequel s'est formé un sol spécifique couvert lui-même par une -végétation caractéristique et affecté d'un certain fonctionnement hydrologique.

Les modalités des composantes, spécifiques d'une unité de milieu donnée, ne sont pas indépendantes mais se commandent en grande partie les unes les autres, les effets rejoignant les causes. Elles sont l'objet d'un ensemble de processus énergétiques interactifs à voies mécaniques, hydriques, géochimiques et biologiques. Ces processus engendrent de multiples boucles de rétroactions négatives aboutissant à un système cohérent, en équilibre dynamique, relativement auto-régulé. Un tel système est d'apparence suffisamment stable à notre échelle spatio-temporelle pour apparaître comme un objet concret identifiable. Deux classes d'unités de milieu différent par le fait que certaines «valeurs» ou modalités (qualitatives ou quantitatives) des composantes interactives sont différentes.

Chaque unité de milieu constitue un système en soi qui, si on l'étudiait à une échelle plus fine, pourrait être subdivisé en éléments plus petits. A cette nouvelle échelle la structuration de l'espace serait alors différente.

A une échelle donnée (ici le 1/50 000), les unités de milieu ainsi définies, s'articulent les unes avec les autres de façon logique et répétitive dans l'espace (topo-séquences, climato-séquences...). Cette répartition spatiale ordonnée est la «structure» du paysage dont rend compte la carte. La légende de cette carte, quant à elle, analyse les unités de milieu en explicitant les modalités des composantes qui les caractérisent.

Naturellement, il existe une certaine hiérarchie entre les composantes du milieu, avec des dissymétries originelles fondamentales et une évolution chronologique. Ainsi à la Réunion, ces dernières sont d'abord d'ordre géologique puis climatique. L'histoire géologique de l'île, commencée il y a environ 3 millions d'années - son mode d'édification, sa tectonique et sa lithologie - a élaboré le cadre structural originel (le «noyau dur») sur lequel ont eu prise les agents climatiques avec pour vecteurs essentiels les alizés est ouest et les perturbations cycloniques.

Ces deux grandes «données de base» originellement indépendantes l'une de l'autre, vont, en interactions, déterminer des dissymétries (faces «au vent» ou «sous le vent»), polarités et gradients, grâce auxquels va évoluer, s'autoorganiser et se différencier régionalement le milieu naturel. Le résultat de cette «cuisine interne» obéissant aux lois de la nature sera l'émergence d'entités cohérentes, à boucles de rétroactions négatives temporairement stabilisatrices, que sont les unités de milieu, éléments du système-paysage global, reliées logiquement entre elles suivant des chrono, pluvio, altitudino, topo-séquences etc.

Le circuit et le régime des eaux vont commander les grands processus antagonistes d'érosion et d'altération des matériaux. Le rapport du couple «érosion/altération» ne garde pas la même valeur dans l'espace et dans le temps. Pendant une période donnée, il qualifie le degré de stabilité d'une unité de milieu. L'évolution peut être lente ou catastrophique, en liaison avec les discontinuités litho-structurales et «à-coups» climatiques. De telles discontinuités spatio-temporelles (laves stratoïdes, intrusions, fractures, cyclones...) sont la règle à la Réunion ; elles guident et accélèrent l'évolution morpho-pédologique. Ceci est très important pour comprendre l'extrême dissection du modelé. La compacité et l'altitude élevée de l'île font qu'une énergie potentielle considérable, sous tension, est prête à être libérée dès qu'un seuil de déstabilisation des matériaux par le travail des eaux,

superficielles ou profondes, est dépassé. C'est le lieu privilégié des processus locaux au départ mais se transformant en causes démultipliées pour les alentours où ils s'emballent et se propagent rapidement. Des zones qui paraissaient stables peuvent ainsi partir ou fonctionner de façon catastrophique (départs brutaux de portions d'îlets, chasses d'eau dans des ravines jusqu'ici inoffensives...). Notons au passage que l'homme fait maintenant partie du système et qu'il a donc un rôle dans son évolution.

Ainsi, les feed-back positifs entraînent la déstabilisation puis l'érosion du milieu alors que les feed-back négatifs sont favorables à sa réorganisation puis à sa stabilisation donc à la pédogenèse.

Sur le matériau géologique va s'installer une activité biologique spécifique, flore, microflore et faune, qui en interactions avec ce matériau, la température, l'humidité et l'aération ambiantes, va finalement créer et stabiliser un écosystème en équilibre dynamique provisoire. En effet, la vie, en particulier les micro-organismes et la végétation, vont, en retour, transformer et «aménager» le milieu édaphique. Le matériau minéral, déjà altéré par les processus météoriques et géochimiques (fragmentation, hydrolyse, lessivage, néoformations minérales...) va alors évoluer par le haut et par voie biochimique en vrai sol, grâce à de nouveaux processus d'altération, d'accumulation, de redistribution et de transformations (acides organiques, enzymes, sécrétions racinaires, incorporations de débris végétaux...).

Le matériau originel transformé en sol, acquiert de nouvelles propriétés (structure, porosité, teneur et nature des argiles...). Le régime hydrique (perméabilité, direction des flux, teneur en eau) change donc aussi progressivement en même temps que ce sol «évolue». A un moment, l'interaction «nature du sol/régime hydrique» peut provoquer une déstabilisation du système se traduisant par exemple par des glissements gravitaires lents mais généralisés de la couverture d'altération. Cette morphodynamique tend alors à régulariser un modelé initialement bosselé (par exemple la topographie irrégulière des empilements des laves). Ce modelé évolue vers un nouvel état d'équilibre plus plan. Nous verrons que la genèse de minéraux phylliteux halloysitiques sur les coulées et cendres (en dessous de 600 mètres d'altitude), rétroagit de cette façon sur la transformation en pseudo-glacis de la topographie des planèzes bosselées originelles (Fig. 6.7). Au-dessus de 600 mètres, l'absence de néoformation halloysitique dans les cendres et le maintien d'une infiltration rapide, ne favorisent pas ces processus de fluage ; dans ces conditions, le modelé bosselé des laves inaltérées, sous-jacentes au manteau cendreux à andosols, se maintient.

Nous avons cité cet exemple pour insister encore sur les notions d'interactions et de rétroactions ainsi que sur la dynamique du système en transformations que constitue le milieu naturel. Sols, modelé, régime hydrique se commandent mutuellement. Les unités de milieu, stables à notre échelle d'observation, se transforment plus ou moins rapidement du fait de leur fonctionnement interne. La structure actuelle du paysage, c'est-à-dire le mode de répartition des unités de milieu et les relations entre elles, s'explique beaucoup mieux quand on envisage aussi la genèse de ces unités de milieu.

A première vue, ces considérations assez abstraites et théoriques n'intéressent pas l'utilisateur des cartes. Cette appréciation peut changer si on considère maintenant le rôle de l'homme en tant qu'élément actif et perturbateur de l'éco-système. L'homme doit aménager son «cadre de vie» et y développer ses activités (agricoles, industrielles, touristiques, urbaines...). Nous verrons par exemple que le défrichement et l'utilisation trop intensive des andosols transforment leurs propriétés, les rendant plus érodibles et moins filtrants. Ce type de milieu, auparavant stable et très perméable, a de fortes chances, si on ne change pas les pratiques culturales, de se dégrader et de s'éroder irréversible ment.

Une telle approche nécessite une «transdisciplinarité opérationnelle» c'est-à-dire, d'une part une vision «intégrée» de l'espace, allant au-delà de l'analyse fragmentaire par «disciplines», d'autre part une finalité qui est l'obtention de documents lisibles et utilisables par le développement, en tant qu'aide à la décision.

Le rôle de l«'intégrateur» est inconfortable. En effet, à partir des principales disciplines d'étude du milieu naturel (géologie, climatologie, géomorphologie, botanique, pédologie, agronomie...), dont une ou deux seulement sont sa «spécialité» d'origine, cet intégrateur doit opérer un certain nombre de traitements et de combinaisons :

– une traduction des différentes «langues» spécialisées,

- une sélection, à l'intérieur de ces disciplines, des faits «pertinents» que l'on choisit de valoriser plutôt que d'autres.
- une mise à échelle compatible des données intéressantes mais relatives à des niveaux de perception variables se trouvant dans les différents travaux monographiques existants,
- une articulation en ensembles cohérents et synthétiques de données de natures différentes,
- une représentation spatialisée, c'est-à-dire une transformation de données souvent ponctuelles en modèles à deux dimensions, nécessitant interpolations et extrapolations, avec certains risques.

Cette entreprise est risquée également d'un autre point de vue. En effet, elle demande une appropriation, une usurpation diront certains, de différentes «chasses gardées» où vous n'êtes pas reconnus. Chaque spécialiste vous attend donc au tournant pour vous faire payer cette audace en fustigeant vos simplifications outrancières, mauvaises interprétations ou extrapolations abusives.

1.3 Plan de l'étude

Avant d'aborder les «unités de milieu», qui sont des unités «intégrées» (synthétiques), il nous a paru nécessaire de traiter, séparément et en préalable, les grandes composantes du milieu, à savoir la géologie, le climat et la végétation, qui «expliquent» en grande partie la morpho-pédologie. Leurs nature et mode de répartition et d'association dans l'espace sont en effet fortement corrélés aux modelés et aux sols.

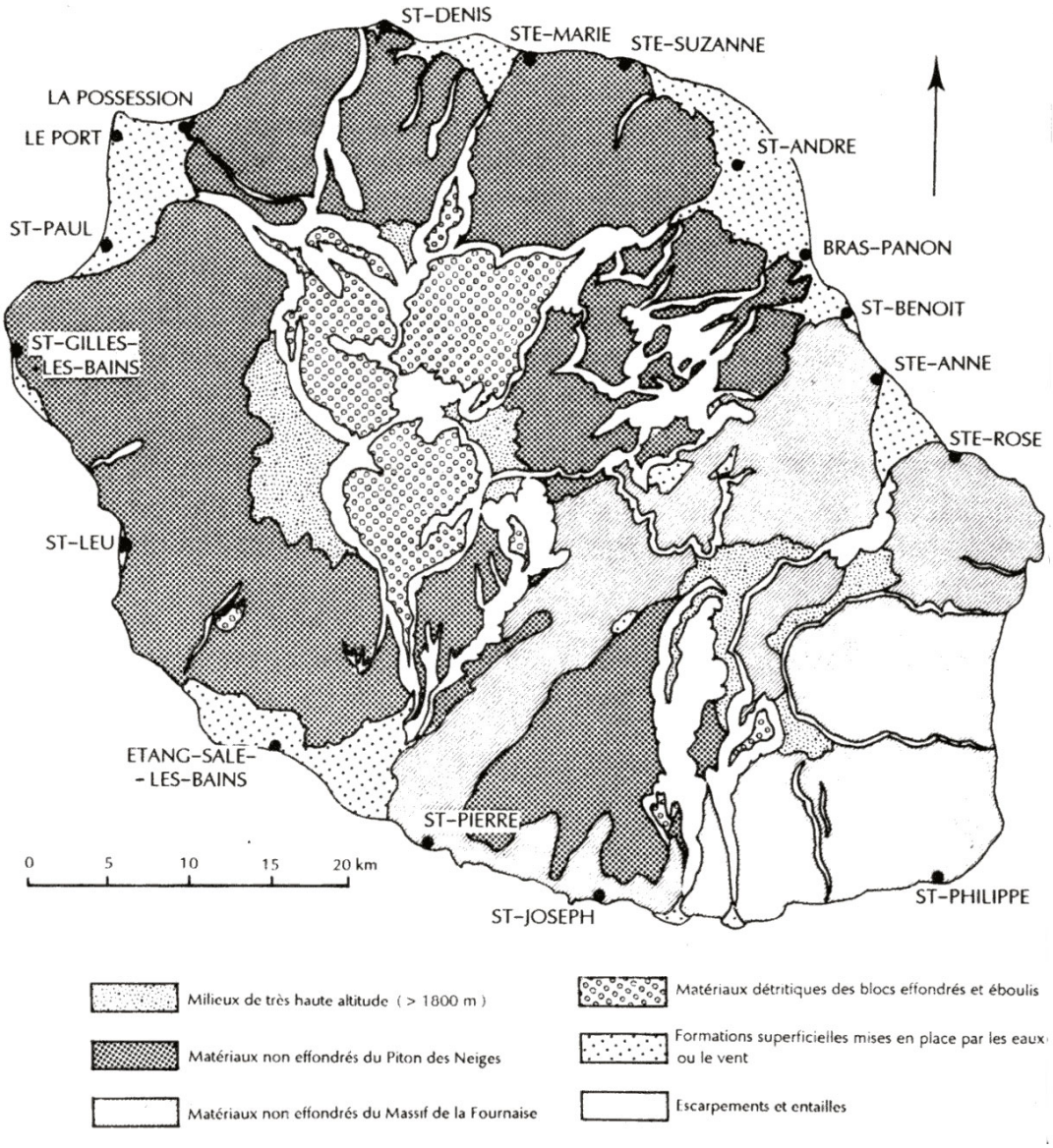
Ensuite, nous avons procédé par dégrossissage progressif, du général au particulier, aboutissant, en fin de course, aux unités de milieu, «équiproblématiques» du point de vue agronomique. Le premier grand découpage spatial du paysage, qui nous a paru le plus pertinent, et que nous avons adopté est le suivant (Fig. **??**):

- les régions sommitales de haute altitude, à landes riches en éricacées («branles»), qu'elles appartiennent au Piton des Neiges ou à la Fournaise,
- les matériaux des pentes externes du Piton des Neiges,
- les flancs de la Fournaise,
- les «cirques» (et autres structures morpho-tectoniques),
- les formations superficielles, en particulier les grands cônes de déjection.

Spatialement ces ensembles n'ont pas tous la même importance. Les critères de leurs subdivisions ultérieures n'interviennent pas partout dans le même ordre :

- **Les régions sommitales de l'île (Chapitre IV)**
  Le découpage a tenu compte du climat (tranches d'altitude) et, en second lieu, de la nature des matériaux superficiels. Il n'a pas paru nécessaire de distinguer plus de quatre unités de milieu (unités 1 à 4).
- **Les pentes externes du Piton des Neiges (Chapitre V)**
  - Le premier critère distinctif (Fig. 6.1) nous a paru être d'ordre géologique (lithologique et chronologique). C'est en effet celui qui a le plus de «poids» explicatif.
  - En second lieu, les «phases» volcaniques ont été structurées en fonction du climat, par l'intermédiaire de l'exposition et de l'altitude.
  - En troisième lieu, à l'intérieur des catégories ainsi définies, ont été différenciées les types de modelé (dissection, formes du relief, pentes...) et les sols. A l'extrémité de la chaîne,; l'association de toutes les caractéristiques précédentes définit l'unité de milieu. Chaque unité de milieu a ainsi été décrite en détail ainsi que sa genèse, son fonctionnement, ses possibilités et conditions d'utilisation agronomiques. Au total une quarantaine d'unités ont été distinguées (unités 5 à 44).

FIG. 1.5 – *Premier découpage hiérarchique du milieu physique. (Cadre de la légende de la carte au 1/50 000)*



(.jpg)

- **Les flancs de la Fournaise (Chapitre VI)** Comme pour le Piton des Neiges, le découpage primaire (Fig. 7.1) tient compte de la chronologie géologique (phases d'activité) car elle est bien corrélée à la présence (ou l'absence) et à l'épaisseur du recouvrement de cendres (qui commande l'épaisseur des sols). Ensuite c'est l'exposition et l'altitude qui sont déterminantes, puis, comme précédemment, le modelé et les sols. Vingt trois unités de milieu cohérentes ont ainsi été décrites (unités 45 à 67).
- **Les «cirques» (Chapitre VII)** Ont été retenus comme critères de distinction des unités de milieu : le climat, le modelé puis les sols (au total 12 unités de milieu, unités 68 à 79).
- **Les formations superficielles (Chapitre VIII)** C'est essentiellement la nature des matériaux puis le climat qui spécifient les sols : l'ensemble des combinaisons définissant 14 unités de milieu (unités 80 à 93).

Un certain déséquilibre peut apparaître concernant la place accordée dans l'exposé à chaque unité de milieu et qui n'est pas toujours proportionnelle à ce qu'elle représente en superficie. En effet :

- Plusieurs unités de milieu peuvent avoir des caractéristiques communes ou voisines qui ont été mentionnées mais non développées à chaque fois pour ne pas alourdir le texte.
- Certains ensembles, importants en superficie, mais ayant de très faibles potentialités agricoles n'ont pas fait l'objet de longs développements.
- Des unités de milieu sont très spécifiques de la Réunion, en même temps qu'elles jouent un rôle important dans l'économie agricole et qu'elles ont des caractéristiques inhabituelles encore assez mal connues: il s'agit des andosols sur cendres volcaniques. Ces sols ont donc une importance prédominante dans cette étude. Leurs caractéristiques, leurs fonctionnements et leurs contraintes d'utilisation agronomiques ont été longuement traités. Il n'était pas utile de détailler aussi longuement d'autres sols, comme les ferrallitiques ou les vertisols, bien connus par ailleurs.

  Par commodité, les unités de milieu sont numérotées. Ces numéros apparaissent sur la carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000 annexée au texte. Cartes et texte sont donc complémentaires et ne doivent pas être séparés.

  Une bibliographie sur la Réunion, la plus complète possible, ainsi qu'une bibliographie sur les andosols en général terminent l'ouvrage.

FIG. 1.6 – *Toponymie physiographique. Noms des principaux lieux remarquables pour la description du milieu physique*

(.jpg)

Chapitre 2

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.1 Morpho structures générales

L'île de la Réunion est constituée de deux gros massifs bien individualisés (Fig. 2.1 et Fig. 2.2) :

- le Piton des Neiges (3 069 mètres d'altitude), inactif,
- le Piton de la Fournaise (2 631 mètres d'altitude), siège du volcanisme actuel.

Entre les deux, s'étendent des «hautes plaines» (Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes), constituées de laves rattachées à la Fournaise.

Génétiquement, ces deux gros ensembles diffèrent sensiblement par les séquences lithologiques et les modes d'épanchement des laves qui les forment, ainsi que par les évènements morpho-tectoniques qui les ont affectés.

Le Piton des Neiges a émergé il y a un peu plus de 3 millions d'années, ses dernières éruptions datant d'à peine 10 000/15 000 ans ; les roches les plus anciennes datées au Piton de la Fournaise ont 500-600 000 ans ; son activité se poursuit actuellement.

L'armature morphologique des deux massifs est de type «volcan-bouclier», avec profils généraux en forme de larges dômes concavo-convexes (Fig. 1.3). Mais le Piton des Neiges, contrairement à la Fournaise, a commencé à évoluer, il y a environ 200 000 ans, en «strato-volcan» (L. STIELTJES), à nette concavité sommitale. Cette «concavisation» est en relation avec une différenciation progressive de ses émissions, des basaltes fluides à sorties plus latérales que centrales, aux trachytes visqueux à tendance pyroclastique (coulées courtes auto-bréchiffiées, cendres, ignimbrites, nuées) et à sorties plus centrales. La Fournaise, ne montrant pas encore une différenciation morphologique et lithologique, en est restée au stade de bouclier basaltique.

Naturellement, les «profils» des massifs, dont les formes générales sont conditionnées par la nature et le mode d'émission des laves ont été fortement affectés par la surimposition des évènements volcano-tectoniques (calderas, pseudo-calderas...) et morpho-tectoniques : creusements des «cirques» avec évacuation des matériaux vers la mer, effondrements corrélatifs régressifs des parois périphériques et affaissements des «îlets». C'est ainsi que la forme primitive de la partie sommitale et centrale du Piton des Neiges (strato-volcan) ainsi que la (ou les) caldera à l'intérieur de laquelle elle se situait, ont été profondément éventrées par le creusement des cirques (Fig. 2.1). Seules les «plaines» de Bebour et de Belouve témoignent nettement de la dernière caldera.

Par contre, la physiographie générale en volcan-bouclier du Piton de la Fournaise et ses emboîtements de calderas («Plaine des Sables» et «Enclos») ont été peu oblitérés. Le déblaiement par l'érosion et la morphotectonique n'impriment leurs effets dans le modelé que sur les flancs sud (Rivière des Remparts, Rivière Langevin) et nord (Rivière de l'Est).

2.2 Le Piton des Neiges

La pétrographie des laves du Piton des Neiges a été bien étudiée, excepté peut être concernant les pyroclastites et tufs des phases explosives terminales.

Le Piton des Neiges est un volcan à laves variées, par leur chimisme comme par leur dynamisme, et de ce point de vue, il est plus intéressant que la Fournaise, pétrographiquement monotone (basaltes exclusivement).

La pétrographie est en partie liée à la chronologie. Le premier aspect est assez bien connu, essentiellement par les travaux de A. LACROIX (1.938), de B.G.J. UPTON et W.J. WADSWORTH (1.965) et de P. NATIVEL (1.973).

L'aspect géochronologique, avec datations radiométriques, a fait l'objet des travaux de J. Mc DOUGALL (1.971), de P.Y. GILLOT et P. NATIVEL (1.982). Pour les pyroclastites terminales, quelques datations (carbone 14) ont été faites par L. STIELTJES (1.982, non publié) et par P. BACHELERY (1.981). Ces mesures sont coûteuses et restent de ce fait, très insuffisantes, compte tenu de la complexité volcano-structurale du système. La chronologie absolue sera donc amenée à être précisée ou modifiée, au fur et à mesure des nouvelles datations.

La structure du Piton des Neiges a été spécialement étudiée par L. CHEVALLIER (1.979).

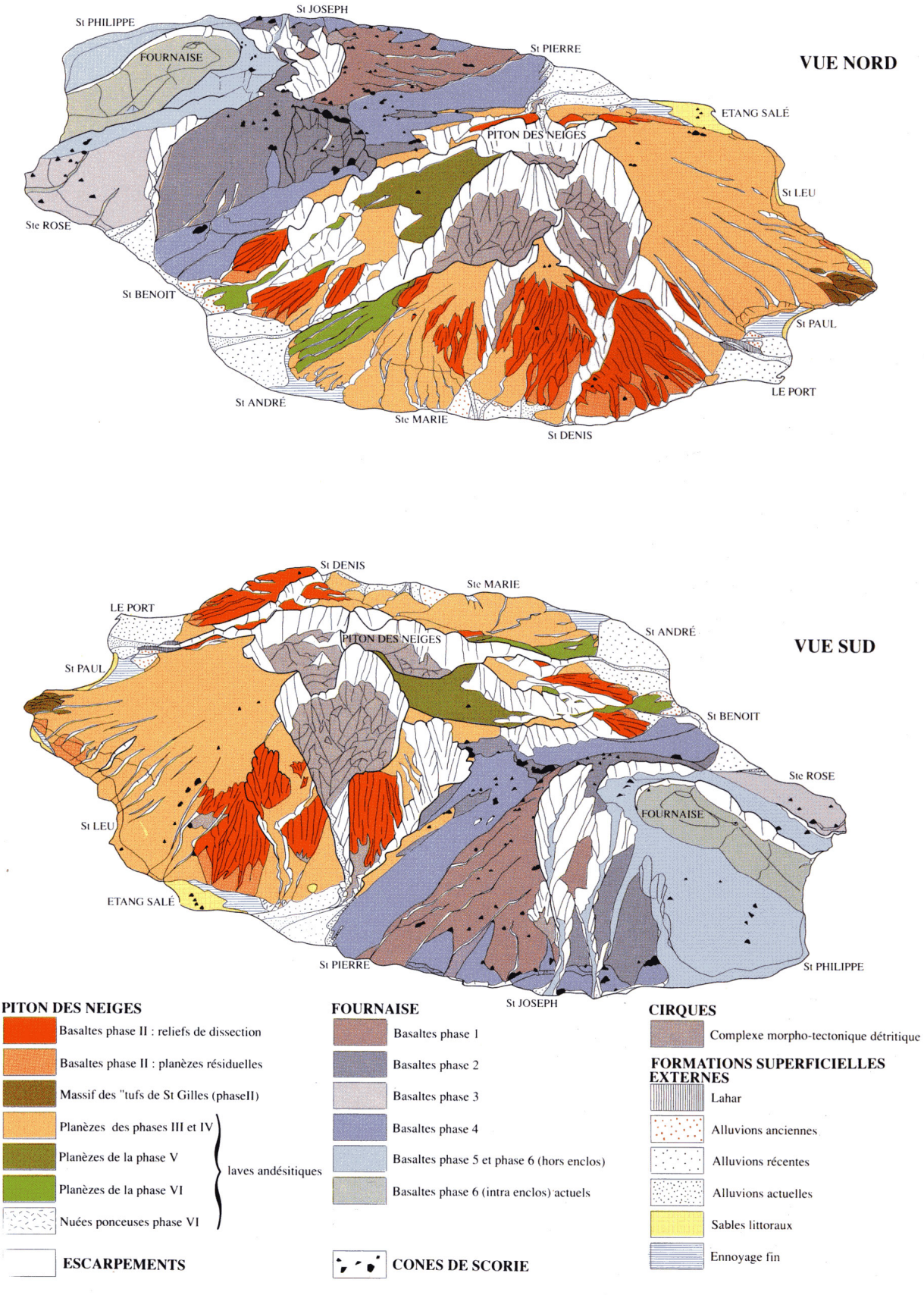
Les aspects stratigraphiques et cartographiques ont été abordés et précisés successivement par P. RIVALS (1.940 réédité en 1.990), P. BUSSIERE (1.958) et G. BILLARD (1.975).

Enfin, les cartographies morpho-pédologiques régionales effectuées dans l'île depuis 1.981 ont permis, après G. BILLARD, de préciser l'étendue des pyroclastites de la phase terminale du Piton des Neiges (M. BROUWERS et M. RAUNET, 1.981 ; M. BROUWERS, 1.982 ; M. RAUNET, 1.985).

L'étude morpho-pédologique générale de l'île, faisant l'objet du travail présent (avec les cartes annexées), nous a amené, en ce qui concerne les évènements récents (postérieurs à 70 000 ans environ), à proposer une chronologie relative plus détaillée (Fig. 2.2). Celle-ci aura pour critères essentiels les faciès pétrographiques macroscopiques, leurs degrés d'altération en fonction du climat, le recouvrement cendreux plus ou moins épais ou bien absent, la présence ou l'absence au sein de celui-ci d'un niveau repère («tuf jaune»).

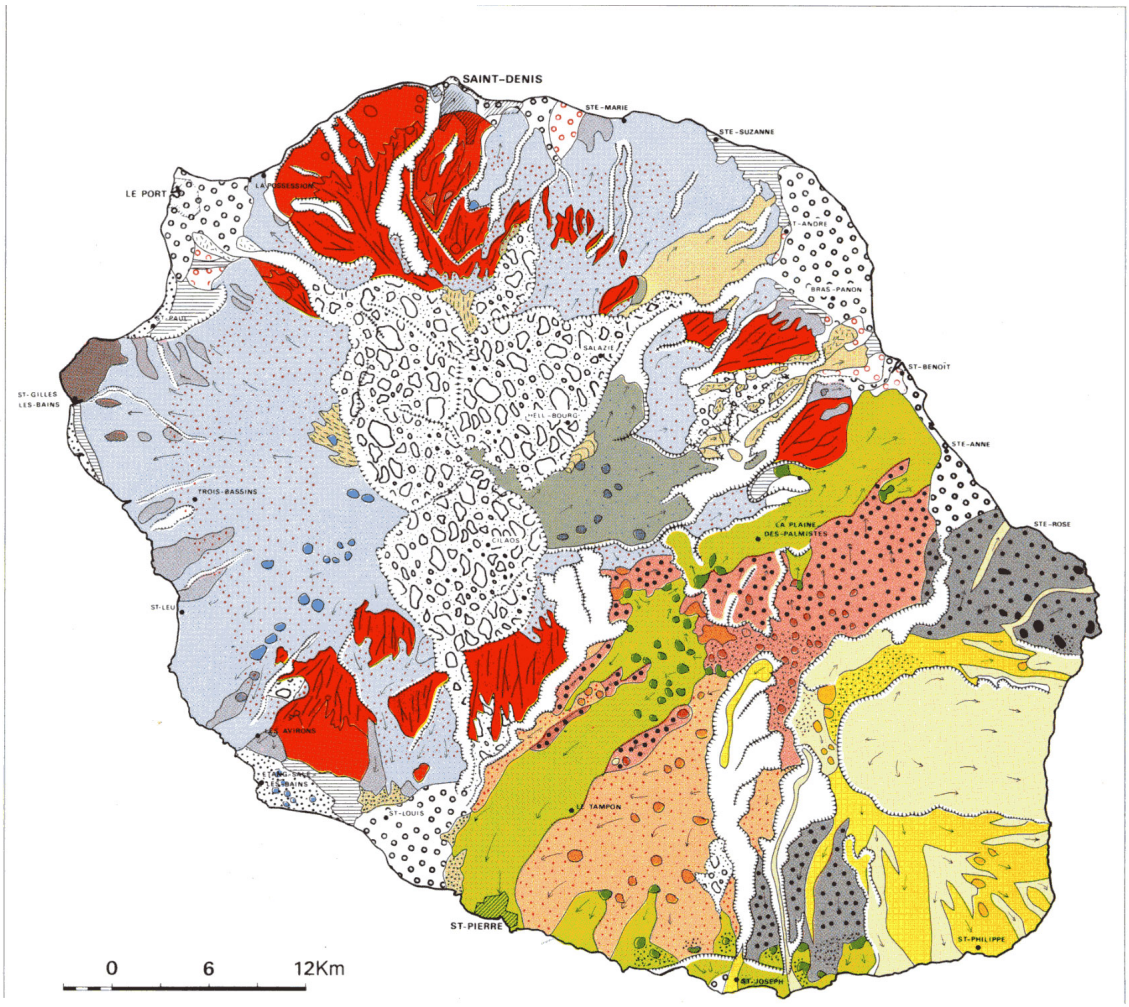
En conséquence, nous reprendrons la même subdivision en quatre «phases» de G. BILLARD, à laquelle nous ajouterons, pour l'activité récente, deux nouvelles phases.

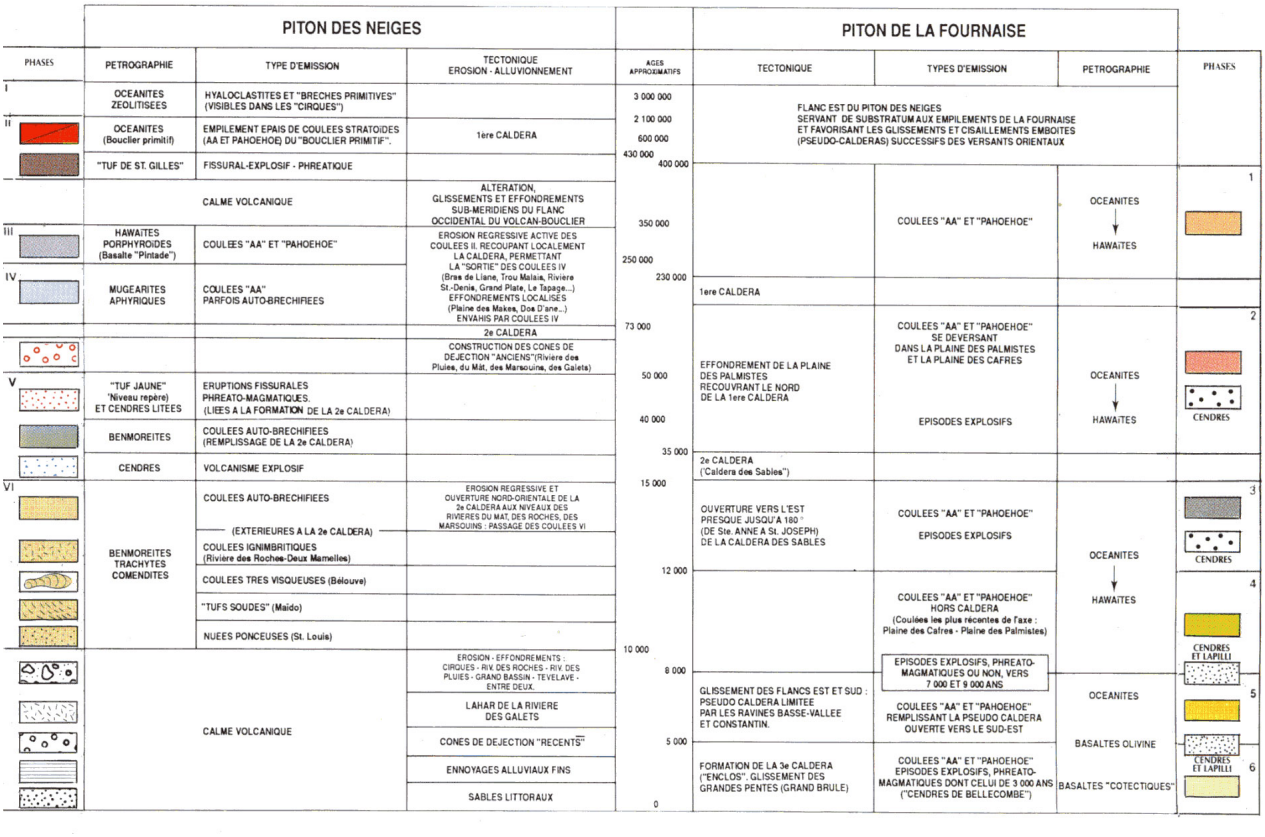
FIG. 2.1 – *Perspectives morpho - géologiques schématiques*



(.jpg)

FIG. 2.2 – *Carte morpho - géologique Prise en compte et modifications des travaux de G. BILLARD (1.975), L. CHEVALLIER (1.979), P. BACHELERY (1.981).*





2.2.1 Phase I

Il s'agit de la série des «Océanites anciennes» composant les «brèches primitives» de L. CHEVALLIER (1.979). Ce sont les plus anciennes roches observables à la Réunion, essentiellement dans les fonds des cirques (jusqu'à une altitude de 1 300 mètres) et à la base de quelques grandes ravines (Rivière des Galets, Rivière du Mât, Bras Rouge, Rivière Fleur Jaune...).

Ces formations correspondent à la phase d'émersion de l'île; elles possèdent pour la plupart une structure hyaloclastique, indiquant une mise en place après traversée d'une zone aquatique (phréato-magmatisme). Elles sont hétérogènes, généralement fortement zéolitisées, ce qui les rend inutilisables pour des datations radiométriques. On sait seulement, par datations des océanites plus récentes non zéolitisées de la série supérieure, qu'elles sont vieilles de plus de 2,1 millions d'années. Les plus anciennes sont estimées aux alentours de 3 millions d'années. L. CHEVALLIER y distingue 4 faciès principaux :

- des laves «pahoehoe» plus ou moins autobréchifiées ou en «pillow-lava» (en coussinets) :
  Elles constituent les formations de base du «substratum relatif» du volcan à peine émergé sur lequel se sont appuyées les séries aériennes postérieures.
- des brèches pyroclastiques :
  Situées au-dessus des formations de laves du «substratum», elles peuvent avoir 700 mètres d'épaisseur. Ces brèches sont soudées, à matrice souvent indurée emballant des éléments millimétriques à décimétriques. Elles possèdent une structure hyaloclastique (éléments à bordures vitrifiées en particulier) témoignant d'un refroidissement brutal en milieu phréatique avant leur dépôt. L. CHEVALLIER y distingue 3 ensembles :
  - Les brèches inférieures sont caractérisées par une structure grossièrement litée (lits de 5 à 20 m), une alternance de brèches pyroclastiques vraies à petits éléments (0,5 cm à 10 cm) de basalte aphyrique englobés dans une matrice indurée brun-rougeâtre, et de coulées. Le tout est intensément zéolitisé.
  - Les brèches intermédiaires sont constituées d'éléments de basalte à pyroxène emballés dans une matrice indurée également à pyroxène. Cette formation, contrairement à la précédente, n'apparaît pas stratifiée ; d'autre part, sa couleur est gris-verdâtre (due à une forte chloritisation).
  - Les brèches supérieures, de couleur grise, sont formées de débris de basalte scoriacé à olivine et/ou pyroxène et feldspath inclus dans une matrice indurée bien minéralisée.
- des tufs scoriacés :
  Ces matériaux rougeâtres de quelques mètres à 50 mètres d'épaisseur, intercalés à tous niveaux dans les brêches primitives, signalent les points d'émission explosive de laves basaltiques non hyaloclastiques, n'ayant pas, avant leur dépôt, traversé de nappe d'eau.
- des brêches de remaniement (ou brêches détritiques anciennes) :
  Ces brèches résultent du démantèlement par l'érosion et la morphotectonique, des édifices volcaniques hyaloclastiques bréchiques d'origine phréatomagmatique («brèches pyroclastiques» précédentes). Le démantèlement a eu des causes diverses : éboulis gravitaires de pentes, solifluxion, lahars, coulées boueuses, effondrements, glissements décollements. En fonction du mode de mise en place et de la durée du transit, les produits présentent différents faciès avec des éléments grossiers très divers (en taille, forme et composition), avec absence ou présence de litage sensible. Contrairement aux brèches pyroclastiques hyaloclastiques précédentes, leur matrice fine est très abondante, friable et terreuse, ce qui les rend encore plus vulnérables à l'érosion. Leur altération zéolitique est poussée et elles sont traversées, comme les autres formations, par de multiples intrusions (dykes, sills...).

2.2.2 phase II

Il s'agit de la «série des océanites récentes», qui constitue le bouclier primitif du Piton des Neiges et en forme l'ossature (large dôme surbaissé surcirculaire). Ces laves, à empilements stratoïdes («aa» et «pahoehoe»), reposent en discordance sur les «brèches primitives». Leur épaisseur peut atteindre 800 mètres. De nombreux

niveaux rouges décimétriques s'intercalent entre les coulées ; il ne s'agit pas de paléosols mais de pyroclastites cendreuses rubéfiées par cuisson. On y trouve aussi des dépôts scoriacés tronqués, en discordance par rapport aux coulées, signalant d'anciens cônes. Enfin, des niveaux colluviaux terreux et alluviaux (galets) forment des poches dans les anciennes gouttières d'accumulation. La base de la série est généralement zéolitisée et peu perméable. Elle constitue une ligne de source visible dans les parois des cirques (Salazie).

Pour cette série, Mc DOUGALL cite des âges compris entre 2 100.000 et 430 000 ans.

En dehors des parois des cirques et des profondes ravines, les laves de la phase II offrent de nombreux affleurements sur les flancs externes du Piton des Neiges, lorsque les nappages des coulées différenciées ultérieures ont été éliminées par l'érosion (Dimitile, Tevelave, Makes) ou bien quand ce recouvrement n'a pas existé.

Dans ce dernier cas, on observe encore, en aval, des planèzes résiduelles assez bien conservées, coiffées de vieux sols ferrallitiques. Elles sont dominées en amont par des reliefs de dissection très accidentés sur basalte altéré, à crêtes algues et vallées encaissées (Fig. 1.3) : massifs de la Montagne, du Brûlé de Saint Denis, de Sans-Souci, des hauts des Avirons - Étang Salé... La route de la Corniche, entre Saint Denis et La Possession, montre les plus belles coupes. On y voit de multiples dykes recoupant la série.

L. CHEVALLIER (1.979) a identifié, à la fin de la phase II, une série d'effondrements polylobés en caldera, qui constituerait la première caldera du Piton des Neiges. Compte tenu de la dissection postérieure intense, la reconstitution de cette ancienne caldera reste hypothétique. On peut en subodorer des traces au niveau de certaines dénivellations linéaires ou curvilignes «anormales», dans les océanites, dominant des laves plus récentes. Le plus net est l'escarpement soulignant le côté oriental du massif de La Montagne ; il domine assez nettement la Plaine d'Affouche et la rive droite de la Rivière Saint-Denis. A cet endroit, la caldera semblait donc ouverte vers la Mer côté nord. Les coulées terminales de la phase il, postérieures à la caldera s'y sont déversées ; les Brûlés de Saint Denis et de Saint François, ainsi que la Plaine d'Affouche en seraient des témoins. D'autres traces de cette caldera pourraient exister dans les hauts de l'est (Bras Citron, Pic des Lianes, amont de la Rivière des Roches, les Deux Mamelles, Ilet Patience...) et les hauts du sud (Dimitile, chaîne du Bois de Nèfles, sud du Rempart de Cilaos...). L. CHEVALLIER estime que ces structures d'effondrement ont un âge compris entre 600 000 et 950 000 ans.

Le cas des «tufs de Saint Gilles»

A l'extrême ouest de l'île, les reliefs collinaires dits «Massifs de Saint Gilles» forment un ensemble très particulier qui tranche par rapport aux planèzes voisines, au-dessus desquelles il émerge. Les matériaux (tufs et brèches pyroclastiques), comme le modelé (en rides aplaties orientées NW-SE), en sont très différents. L'ensemble le plus vaste est situé entre la Ravine Saint Gilles et la Ravine Fleurimont, mais on en observe un témoin important à l'est de Saint Gilles jusqu'à 275 mètres d'altitude (chemin carrosse-Moulin Kader) et un ultime affleurement surbaissé et allongé, au sud de la Ravine de l'Ermitage.

Hors affleurements, ces «tufs» disparaissent sous les coulées des phases III et IV qui les ont envoyés et qui s'y appuient en amont, pour former de vastes «plateaux» de grand intérêt agricole.

Les coulées de la phase IV, se sont insinuées dans les gouttières de creusement de ces formations, pour donner de belles coulées de vallée qui arrivent à la mer aux niveaux du Cap des Aigrettes et de Boucan-Canot (photo A.22). En amont, certaines se trouvent en position perchée (inversion de relief) du fait des entailles postérieures (Fig. 6.5).

FIG. 2.3 – *photo 22 :* ***Ouest de l'île - Région de Grand-Fond Boucan-Canot*** *collines au premier plan et au fond : «tufs» de Saint-Gilles (phase II) ; au centre : coulée de vallée de la phase IV en inversion de relief au dessus de la gouttière de Boucan-Canot. Cultures irriguées par le Canal Prune (Ravine St-Gilles) arboriculture en terrasses sur sols bruns peu épais, maraichage sur sols vertiques dans la gouttière, canne et maraichage sur vertisols de la coulée de vallée*

(.jpg)

Qualifiées globalement de «tufs» par l'usage, mais un peu abusivement, ces formations de Saint Gilles présentent essentiellement deux faciès pétrographiques :

- un faciès de teinte générale claire, composé d'un ciment cendreux crème plus ou moins consistant, emballant des éléments anguleux divers en taille et composition (océanites, péridotites, basaltes feldspathiques) dont certains présentent des bordures vitrifiées ayant subi une «trempe» témoignant donc d'une mise en place après traversée d'une zone aquatique, probablement la mer. Il s'agit de formations basaltiques explosives phréato-magmatiques (P. BACHELERY, 1.988).
- un faciès «lavique» de teinte sombre, exclusivement bréchique, à éléments basaltiques de toutes tailles, soudés. Vis à vis de l'érosion, cette brèche est globalement plus cohérente que le matériau précédent. Elle forme souvent des masses rocheuses et «pignons» résiduels noirâtres après dégagement des tufs cendreux clairs qui les emballent. Les affleurements sont ainsi nombreux en bordure des dômes allongés qui constituent le modelé de ces formations (Fig. 6.5). Ce faciès résulterait de la mise en place de laves autobréchifiées en milieu marin (P. BACHELERY, 1.988).

Les «tufs» de Saint Gilles sont donc une association très imbriquée de brèches phréato-magmatiques claires et de coulées auto-bréchifiées plus fortement soudées. On n'y observe pas d'organisation nette. La falaise littorale, entre le Cap La Houssaye et le Cap des Aigrettes, montre localement des pseudo-litations d'épaisseurs irrégulières et festonnées semblables à des structures de «fluage» gravitaire des produits volcaniques, après leur émersion marine, mais encore imprégnés d'eau.

On peut également se poser la question de savoir si les directions topographiques actuelles (axes des rides et des vallées), grossièrement orientées N-110, correspondent à une direction tectonique, et si le creusement des vallées n'a pas été guidé par des failles.

P. BACHELERY (1.988) a signalé dans la ravine Saint Gilles (entre le Bassin Malheur et le Bassin des Cormorans) la présence d'une coulée de vallée postérieure aux «tufs» de Saint Gilles, composée d'océanites et de basaltes à olivine donc caractéristique de la phase II probablement tardive. D'autre part au sud de Saint-Gilles-les-Bains (au-dessus du 2ème village), les «tufs de Saint Gilles» sont enfouis sous une série de coulées de basaltes à tendance «pahoehoe» assez anciens (au vu de leur altération de surface à racines de sols ferrallitiques fortement érodés) qui sont très différents des laves différenciées des phases III et IV. Ce sont des basaltes très sombres à microlithes de feldspath et sans olivine visible à l'oeil nu.

Ces vielles planèzes constituent 2 panneaux littoraux séparés par des coulées de la phase IV : l'un au sud immédiat de Saint Gilles, l'autre, plus vaste, juste au-dessus de la Saline Les Bains/Trou d'eau (zone de «Bois de Nèfle»).

Chronologiquement, ces basaltes semblent dater de la fin de la phase II. D'autant plus que leur aspect macroscopique (très fins cristaux de feldspath) est le même que celui des basaltes de la zone de Sans-Souci, qui eux, présentent un modelé de dissection et une bonne couverture ferrallitique, caractères tout à fait typiques des séries de la phase II observées par exemple à La Montagne.

Il reste à comprendre pourquoi les coulées des phases postérieures (III et IV) n'ont pas nappé ces planèzes anciennes qui ne présentent pas de différences topographiques sensibles. Sans doute existe-t-il, de part et d'autre de ces planèzes de ta phase II, des paléo-gouttières fossilisées, vers lesquelles se seraient engouffrées préférentiellement les coulées plus récentes jusqu'à «niveler» la topographie.

TRACES D'UNE MORPHOTECTONIQUE ANCIENNE SUR LE FLANC OUEST DU BOUCLIER PRIMITIF

La façade occidentale du bouclier d'océanites de la phase II, pourrait avoir subi des glissements d'ensemble vers la mer, un peu comparables à ce que l'on observe actuellement sur les «grandes pentes» de la Fournaise (P. BACHELERY, 1.981). Pour argumenter cette thèse, on peut citer deux faits d'ordre morphologique :

- entre La Possession et le Cap La Houssaye d'une part, entre le Cap La Houssaye et Les Avirons d'autre

part, la bordure rocheuse de l'île (excluant les alluvions littorales), forme 2 grands «rentrants» concaves comparables pour la Fournaise à celui du Grand Brûlé qui, dans le prolongement oriental de la dernière caldera («Enclos») glisse actuellement vers l'est, entre les remparts de Bois Blanc et du Tremblet formant une pseudo-caldera. Dans cette zone, les glissements étagés plongent en mer à un rythme supérieur à l'arrivée des laves par l'amont. Le bilan est alors à la «concavisation» de la côte.

Les mêmes processus morpho-tectoniques ont pu avoir lieu sur le versant occidental du bouclier ancien. Le massif des «tufs de Saint Gilles», issu de volcanisme fissurai indépendant des empilements des coulées du bouclier, aurait alors servi de môle résistant, formant un point d'appui stable aux 2 séries de glissements, l'un vers le NW (Saint Paul/La Possession), l'autre vers l'W-SW (Saint Gilles/Les Avirons). Les «tufs de Saint Gilles» se poursuivent vers l'E-SE dans le prolongement du «Rift N-120 ° ». Ceux-ci auraient constitué, d'une part un axe-charnière pour les deux séries de glissements en fin de phase II et d'autre part, postérieurement, une assise sur laquelle se sont appuyées les coulées des phases III et IV ; celles-ci, en s'empilant en amont, ont permis la création de vastes épaulements perchés entre 300 et 600 mètres d'altitude. Ce sont les «plateaux» à pentes faibles, qui s'étendent entre la Ravine du Bernica au nord et la Ravine des 3 bassins au sud.

– un autre argument allant dans le même sens est la présence, à 1 à 2 km de la côte (Fig. 1.1), d'un escarpement semi-continu affectant la phase II moulée et fossilisée par les nappes des phases III et IV, sub-parallèle à la concavité du «golfe de Saint Leu». Il ne s'agit pas d'une ancienne falaise littorale puisque des terrains de phase II s'observent en aval de cet escarpement (entre Saint Gilles-les-Bains et la Saline-les-Bains). Il ne peut s'agir que d'une forme tectonique. L'équivalent s'observe en bordure du «golfe de Saint Paul» (Fig. 9.1) où cet escarpement tectonique a probablement été retouché par le sapement marin qui l'a verticalisé.

  En amont de cet escarpement majeur marquant la cicatrice de glissement des panneaux aval du bouclier plongeant en mer, la carte topographique au 1/25 000 permet d'identifier des ruptures de pentes transverses «anormales», sub-parallèles entre elles, qui pourraient être d'autres lignes de glissement du bouclier, scellées par les coulées postérieures.

phase III

La phase III marque le début de la différenciation chimique des laves (des basaltes riches en olivine vers les laves alcalines plus riches en silice), suite à une période de repos volcanique d'environ 80 000 ans après la fin de la phase II. A l'intérieur de la première caldera, largement ouverte vers la mer (surtout à l'ouest), s'édifie un massif central duquel se déverse, à partir de puys et fissures latéraux, des nappes de laves recouvrant les flancs du bouclier de la phase II qui avaient déjà subi une dissection orientale (coulées de vallées) et une altération sensible. Mc DOUGALL (1.971) propose une durée de 100 000 ans pour cette phase, qui serait comprise entre 350 000 et 250 000 ans.

Les roches de la phase III sont surtout des hawaïtes. Ce sont des laves alcalines (tab.2.1) à plagioclases basiques de la famille des andésites (andésites labradoriques). Le faciès le plus caractéristique est l'hawaïte porphyroïde à phénocristaux de plagioclase, dénommée localement «roche pintade». Ce faciès se reconnaît aisément et constitue un bon critère de distinction rapide par rapport aux laves de la phase IV, vis à vis desquelles il s'oppose aussi par sont altération plus avancée (sols brun-rouge fersiallitiques sur arène feldspathique dans l'ouest avec libération de blocs émoussés).

Les hawaïtes nappent tout l'ouest entre La Possession et Les Avirons où elles peuvent avoir une épaisseur de 500 mètres. Elles affleurent lorsque les coulées de la phase IV ne les ont pas recouvertes, essentiellement en dessous de 1 000 mètres d'altitude. Les affleurements les plus étendus (Fig. 6.6) se situent au niveau de Bernica, entre Trois-Bassins et Saint Leu (Pointe des Châteaux) et près des Avirons. Au sud, les coulées de la phase III ont évité les massifs du Maniron, le massif du Bois de Nèfle (Bras de la Ravine Goyave) et le Dimitile. Elles se sont déversées entre ces massifs, dans les ouvertures tectoniques (glissement-effondrement des Makes, nord du Dimitile au niveau de La Chapelle) ou les exutoires d'érosion (le Tapage) pour finir au nord de Saint-Louis.

Au nord et au nord-est de l'île, les coulées de la phase III sont moins étendues ; elles ont emprunté des gouttières

d'érosion de la première caldera. On en voit des témoins non recouverts par les coulées postérieures, à Sainte Marie ; on les observe aussi en aval du Morne du Bras des Lianes, des massifs d'Eden et du Cratère, où elles prennent la forme de lanières perchées en inversion de relief, dominant les terrains disséqués de la phase II.

Les hawaïtes sont actuellement altérées en sols ferrallitiques épais sur le flanc NE (au vent) et fersiallitiques ou bruns ferruginisés dans l'ouest (sous le vent).

Phase IV

Cette phase correspond à un changement pétrographique. Le chimisme des laves se différencie encore davantage. Les mugéarites deviennent alors dominantes. Ce sont des Andésites alcalines riches en plagioclases, de teinte gris-clair, généralement aphyriques. Elles ne contiennent plus d'olivine. Par rapport aux hawaïtes (tab. 2.1), elles sont plus riches en silice (50 à 52 % SiO_2), moins riches en fer (10 % FeO + Fe_2O_3), en magnésium(4% MgO), en calcium (7 % CaO).

Cette phase (Fig. 2.2) s'échelonne entre 230 000 et 70 000 ans (Mc DOUGALL, 1.971).

L'épaisseur des mugéarites est en moyenne de 50 mètres. Elles nappent les hawaïtes presque totalement. Les coulées de la phase IV sont de type «aa» ou «autobréchifié» (absence de coulées «pahoehoe» contrairement à ce qu'on voit en phase II et parfois encore en phase III). Les coulées autobréchifiées sont plus abondantes dans la phase terminale comme on le constate sur les planèzes situées entre les hauts de Saint Paul et Le Tevelave. Dans l'ouest, en dessous de 1 000 mètres d'altitude, le recouvrement est faible (souvent inférieur à 10 mètres), excepté dans les vallées préexistantes qui entaillaient la série des hawaïtes et où les coulées de la phase IV, en s'écoulant, se sont fortement épaissies. Entre Bois de Nèfles et Les Avirons, le contact phase IV/phase III est fréquemment observé dans les flancs des ravines. Il est alors souligné par la présence d'un paléosol rougeâtre enterré. La même chose s'observe au nord, entre Sainte-Marie et Sainte-Suzanne.

Sur un même versant («au vent» ou bien «sous le vent»), l'altération météorique des coulées de la phase IV, lorsque le recouvrement pyroclastique récent y a disparu (c'est-à-dire en général en dessous de 350 mètres d'altitude), est toujours moins poussée que celle de la phase III. Dans l'ouest, les laves de la phase IV portent des sols bruns et au nord-est, des sols faiblement ferrallitiques. Pour comparaison, les laves de la phase III portent respectivement des sols fersiallitiques et des sols ferrallitiques épais.

Donc pour une frange d'altitude et des coulées identiques, la comparaison «pluviométrie/âge des roches» explique la nature et l'intensité de la pédogenèse.

Du point de vue tectonique, la fin de la phase IV (il y a environ 70 000 ans) a vu la formation d'une deuxième caldera, sous la forme de séries d'effondrements arqués se recoupant, dans la partie centrale du massif. L. CHEVALLIER (1.979), en partant de l'analyse structurale dans les cirques (densité et pendages des intrusions, fractures, rebroussement de coulées, importance des rejets) a tenté de reconstituer les limites de cette caldera. Les seuls témoins conservés des remparts initiaux sont les escarpements qui dominent, à l'est et au sud, les «plaines» des Marsouins, de Belouve et de Bebour. Le remplissage de ces plaines est post-caldera, et nous en avons fait une phase V (voir plus loin). La caldera semblait ouverte au niveau de la Rivière du Mât.

Phase V

Les coulées.

G. BILLARD (1.975) avait inclus dans la phase IV, les laves ayant rempli la 2ème caldera («Plaine» des Marsouins, «Plateaux» de Bebour et Bélouve). Nous avons préféré en faire une phase V pour les distinguer des coulées anté-caldera, d'autant plus qu'elles semblent correspondre à une différenciation chimique plus évoluée vers les trachytes.

Il s'agit cette fois en majorité de benmoréites (trachy-andésites alcalines), se distinguant des mugéarites de la

phase IV par une teneur plus élevée en silice (55 % au lieu de 50 %), en sodium et en potassium, plus faible en fer et en magnésium (tab. 2.1). Ce sont des roches gris-clair, qui ont été émises en coulées assez visqueuses «autobréchifiées», riches en gaz.

Les produits pyroclastiques

Consécutivement à la formation de la 2ème caldera, donc post-phase IV, le Piton des Neiges a émis une grande quantité de pyroclastites «acides» (tufs, cendres, nuées) a tendance trachytique (photo A.36). Les tufs et cendres ont recouvert la totalité du Piton des Neiges, une partie du flanc occidental de La Fournaise et une partie des coulées de la Plaine des Cafres. Cette période explosive a duré longtemps, environ 25 000 ans, comme l'indiquent les datations au carbone 14 de bois carbonisés qui ont été prélevés dans les pyroclastites (- 40 000 à - 15 000 ans).

Une partie des pyroclastites ont a été émises à la même époque que le remplissage de la 2ème caldera par des benmoréites. Il semble que ce soit le cas des «tufs jaunes» qui forment un «niveau-repère» (30 à 300 cm d'épaisseur) que l'on retrouve un peu partout sur les flancs externes du Piton des Neiges à la base ou au sein du recouvrement cendreux.

Le «Tuf jaune» (ocre-jaune à beige), de composition nettement trachytique (tab. 2.1), est composé d'éléments ponceux de teinte claire, de petits fragments (0,5 à 3 mm) de laves différenciées et de cendres, l'ensemble s'étant soudé lors du dépôt. Des petits cristaux blancs de feldspath y sont fréquemment présents. Le niveau, relativement continu, moule la morphologie volcanique antérieure (phases III, IV et V). Il s'agit donc de retombées aériennes qui pourraient être d'origine «phréato-magmatique». Ce tuf est peu poreux et massif ; il peut constituer un obstacle sérieux pour les plantes en limitant la profondeur utile du sol. Il rappelle les «talpetate» d'Amérique Centrale. Bien que friable, il s'altère très lentement par rapport aux cendres qui lui sont associées, si l'on juge par l'avancement de la désilicification (58 à 60 % SiO_2 pour le tuf, 15 à 25 % pour les cendres), en supposant des teneurs initiales voisines en silice. En dehors du «Tuf jaune» et des cendres à retombées aériennes, pendant la même période ont été émises des nuées ponceuses et des projections plus hétérogènes et blocailleuses qui se sont soudées. Il s'agit essentiellement :

- des «nuées ponceuses» (ou coulées pyroclastiques) de Saint Louis - Saint Pierre,
- des «tufs soudés» du Maïdo et de la Roche Ecrite.

Les «nuées ponceuses» :

Les lambeaux les plus importants sont situés d'une part au nord immédiat de Saint Louis et à l'Entre-Deux où elles recouvrent les laves des phase III et IV, d'autre part à l'ouest de Saint Pierre, où elles sont en partie recouvertes par les basaltes récents (environ 10 000 ans) rattachés à La Fournaise descendant de la Plaine des Cafres. La plupart de ces accumulations ont été évacuées par l'érosion aux débouchés du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine à l'emplacement où s'est construit le vaste cône de déjection de la Rivière Saint-Etienne.

G. BILLARD (1975) a distingué au sein de cet ensemble plusieurs «unités» superposées à faciès assez différents. En gros, il s'agit d'écoulements pyroclastiques à éléments ponceux (émulsions) gris noirâtre dominants, incluant des éléments divers en taille (1 mm à 1 dm) et composition (basaltes à olivine, hawaïtes, mugéarites, benmoréites) issus du ramonage des laves antérieures encaissantes ; le tout est bien cimenté par des cendres qui devaient être incandescantes lors de la mise en place.

En dehors des localisations sus-mentionnées, des faciès très comparables (mais moins soudés et moins épais) ont été observés en divers endroits du versant ouest de l'île (Grand-Fond, Piton des Aigrettes, hauts de Saint-Gilles, Bernica, Nord-Ouest d'Etang-Salé-les-Bains...)

Les «tufs soudés» :

Sont appelés ainsi les dépôts qui nappent le revers du Piton Maïdo (Brûlé de Saint Paul) présentant l'aspect d'une dalle de 1 à 2 mètres d'épaisseur composée d'une brèche à éléments hétérogènes (des gabbros aux roches acides) soudés dans des cendres et sables trachytiques. Cette dalle se débite en gros prismes verticaux. Elle

passe en profondeur à des sables et scories ponceuses gris-noirâtre qui rappellent fortement les formations décrites précédemment pour les nuées ponceuses. Il est donc tentant de mettre ces 2 formations en relation chronologique et pétrographique.

Dans la région des hauts-de-Saint-Gilles, les «ponces noires» sont souvent observées sous les «ponces claires» à rapprocher des «tufs jaunes». A l'inverse, au Maïdo, la dalle soudée repose sur des cendres rubéfiées par cuisson.

En définitive, on peut supposer qu'il y a eu, entre 40 000 ans et 15 000 ans, une imbrication de ces différentes sorties pyroclastiques explosives fissurales («tuf jaune», cendres, ponces noires, ponces bréchiques), alternant des faciès de ramonage à xénolithes donc de composition globale mixte (basalto-andésito-trachytique, le ciment cendreux étant trachytique), et de magma cendro-ponceux purement trachytique, davantage acide. Projections aériennes et nuées latérales se sont succédées. Leurs sites de sorties (fissurales) sont inconnus. Ils devaient être sur les flancs de la partie sommitale du strato-volcan central, dans la deuxième caldera ou sur ses failles bordières. Les évidements des cirques et leur morphotectonique ont tout effacé.

Phase VI

Presque toutes les coulées des phases IV et V, au-dessus de 300 mètres d'altitude, sont recouvertes par des cendres du Piton des Neiges, parfois sur 3 mètres d'épaisseur.

Les coulées, relativement peu étendues, qui ne sont pas recouvertes par ces cendres sont donc postérieures à la phase V et aux recouvrements cendreux dont l'épisode se serait terminé il y a environ 15 000 ans. Pour distinguer ces coulées terminales que l'on peut situer entre 15 000 et 10 000 ans, nous les avons regroupées dans une phase VI (Fig. 2.2).

Il y a 3 ensembles principaux peu altérés localisés sur le versant N E :

- sur la rive gauche de la Rivière du Mât, en amont de Saint André (photo A.57) : il s'agit d'une série de coulées visqueuses autobréchifiées de teinte claire, probablement benmoréitiques, recouvrant les coulées de la phase IV et probablement, en aval, un cône de déjection ancien.
- au débouché de la Rivière des Roches. Une petite coulée de nature trachytique, d'aspect ignimbritique à modelé de molles ondulations, composée d'une roche claire à structure «flammée». Ces coulées, qui ne sont pas arrivées à la mer, recouvrent directement un cône de déjection ancien à sols faiblement ferrallitiques.

  L'origine des émissions est à rechercher en amont des bassins de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins, zone très accidentée et pratiquement inaccessible ; la morphotectonique et la dissection y sont très actives avec formation de nombreux compartiments diversement affaissés par effondrements-glissements prenant naissance au sein du substrat profond altéré de la phase II. Ces lambeaux de «plateaux» effondrés sont probablement formés de la nappe d'ignimbrite disloquée qui semble avoir pour origine, à 1 400 mètres d'altitude, la fissure émettrice des «2 Mamelles» orientée NW-SE, dont une partie a été effacée par la morphotectonique. Les nuées qui s'y sont échappées ont dévalé les vallées existantes, pour s'étaler en aval sur le cône de déjection de l'époque.
- au débouché de la Rivière des Marsouins (Takamaka)

  Il s'agit de petites coulées autobréchifiées, parfois ignimbritiques, de benmoréites claires, émises à partir de cônes situés sur le «plateau» du Camp de Marseille et dans la vallée encaissée de la Rivière des Marsouins. Ces coulées de vallées, étroites et peu fluides, se sont étalées en aval, sans atteindre la mer, sur le cône de déjection ancien.

TAB. 2.1 – *Composition chimique moyenne des laves de l´île de la Réunion*

FACIÈS	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
OCEANITES	42	10	5	9	20	7	1,5	0,5
BASALTES A OLIVINE (basaltes alcalins)	45	14	4	7	8	10	2	0,9
HAWAITES (andésites labradoriques)	47	17	3,5	8	5	10	3	1,5
MUGEARITES (andésites alcalines)	50	17	5	6	4	7	4,8	1,8
BENMOREITES (trachy-andésites)	55	18	3	5,5	3	6	5	2,5
TRACHYTES (petites coulées, nuées ponceuses, tuf jaune, cendres du Piton des Neiges)	60	16	3	4	1	3,5	6	3
COMENDITES (exceptionnel)	69	16	2,5	-	0,1	0,5	6,2	5

2.3 Le Piton de la Fournaise

Structuralement et pétrographiquement, le Piton de la Fournaise est plus «simple» que le Piton des Neiges car il est plus récent donc moins disséqué, et ne possède pas de laves chimiquement différenciées. Il en est au stade de volcan-bouclier, de nature exclusivement basaltique (Fig. 2.1 et Fig. 2.2).

La Fournaise a fait l'objet d'un travail détaillé de P. BACHELERY (1.981) avec carte au 1/50 000. Nous reprendrons en grande partie ses résultats, tout en suggérant quelques modifications d'ordre chronologique inspirées par les recouvrements différentiels de cendres issues du Piton des Neiges et de la Fournaise proprement dite.

Comme pour le Piton des Neiges un certain nombre de phases d'activité peuvent être distinguées, basées non pas sur l'évolution chimique des laves mais sur les évènements tectoniques et en corrélation avec l'épaisseur et la nature des recouvrements pyroclastiques.

2.3.1 Phase I

Elle correspond au «bouclier primitif» de la Fournaise.

Les plus anciennes roches datées sont âgées de 535 000 ans (GILLOT et NATIVEL, 1.989).

Le vieux bouclier n'affleure actuellement qu'au sud-ouest du massif, essentiellement entre la Rivière des Remparts et la Plaine des Cafres (photo A.49). Ce vaste panneau est profondément entaillé par un réseau hydrographique dense à axes sub-parallèles E-W faisant un angle net avec le réseau SSW-NNE peu évolué et beaucoup plus récent de la Plaine des Cafres (photo A.49). Tous ces basaltes montrent une altération sensible en boules desquamées en «pelures d'oignon». Cette altération est d'autant plus poussée que l'altitude est basse. Dans la zone littorale (est de Saint Pierre) ils sont ferrallitisés. Excepté dans cette zone, où les cendres superficielles ont été décapées, les basaltes de la phase I sont recouverts par des pyroclastites issues du Piton des Neiges. Ces cendres présentent en intercalation le «tuf jaune» à débris de feldspath caractéristique (niveau- repère), de 30 à 60 cm d'épaisseur. Ce recouvrement de cendres à tuf jaune ne s'observe pas sur les coulées plus récentes de la Fournaise.

La phase I s'est terminée, il y a environ 290 000 ans, par l'effondrement d'une 1ère caldera, dont il reste peu de témoins. Cette caldera semblait se déployer vers la Plaine des Palmistes actuelle où elle a été reprise par la tectonique postérieure de cette dernière et enfouie sous les débordements de la phase 2. Au sud du Nez de Boeuf, on ne sait pas où passait exactement le rempart de la caldera 1.

2.3.2 phase II

Les coulées de la phase II ont rempli la 1ere caldera, en débordant dans sa partie nord et probablement aussi au sud-ouest et à l'ouest (Plaine des Cafres). Ces coulées constituent essentiellement le flanc nord de la Fournaise c'est à dire le vaste panneau de Piton Armand-les-Hauts, qui s'étend entre la Rivière de l'Est (prolongée par le Rempart des Sables) et la partie orientale de la Plaine des Palmistes (Grand-Fond, Fond de Bras- Piton). On les trouve aussi sur la Plaine des Remparts et le Morne Langevin. Enfin, elles apparaissent dans la Plaine des Cafres, lorsque les coulées plus récentes ne les ont pas recouvertes.

La phase II semble avoir duré longtemps (début : 150 000 ans, fin : 40 000 ans ?) ; ses coulées, contrairement à celles de la phase I ne sont pas recouvertes par le «tuf-jaune» du Piton des Neiges. Par contre, on y observe, en dessous de la zone à bruyères d'altitude (1 800 mètres), une épaisse couche de cendres (plus de 1 mètre) issues de la Fournaise. Les basaltes de la phase II ne montrent qu'une très faible altération. Ils sont peu entaillés par le réseau hydrographique (peu ramifié). Cela milite pour un âge relativement récent concernant les dernières coulées.

La phase II a vu probablement l'effondrement de la Plaine des Palmistes ayant recoupé et effacé le rempart de la 1 ère caldera, Ainsi le «fond» de la Plaine des Palmistes (Grand-Fond et Fond de Bras-Piton) est rempli de basaltes de la phase II, «ante-effondrement» à la base et «post-effondrement» (discordance) au sommet, les dernières coulées ayant dévalé les escarpements curvilignes poly-lobés. Dans la Plaine des Cafres, la zone dite «Pâturage de Biberon» correspondrait à la lère partie de la phase II, antérieure à la tectonique de la Plaine des Palmistes.

La phase II se termine par la formation de la 2ème caldera (dite «Caldera des Sables»), dont une partie du rempart occidental est fort bien conservé (Rempart des Sables se prolongeant par le Rempart du Fond de la Rivière de l'Est).

2.3.3 phase III

Cette phase correspond au remplissage de la 2ème caldera. Celle-ci semblait très largement ouverte vers l'est. Le rempart actuel (Rempart des Sables et du Fond de la Rivière de l'Est) semble se poursuivre sous les ennoyages des laves de la phase III, qui auraient ainsi largement débordé la caldera en s'étalant sur presque 180 ° , jusque vers Sainte Anne au nord et vers Saint Joseph au sud. Au nord-est, les affleurements de ces basaltes occupent le vaste panneau situé entre la Ravine Constantin et la Rivière de l'Est (forêt Mourouvin). Au sud, ils s'étendent entre le Rempart de Basse- Vallée et les planèzes de Jean-Petit, en passant par La Crête.

La plupart du temps les basaltes (non altérés) de la phase III sont recouverts par des cendres de la Fournaise, ayant une épaisseur appréciable (tab. 2.2). Cette épaisseur est plus grande dans les zones de La Crête et de Jean Petit (1 à 2 mètres en moyenne sur les replats) que dans les Hauts de Sainte Rose (moins de 1 mètre). Les bossellements dûs aux fronts et aux bordures de coulées (coulées «aa» essentiellement) affleurent beaucoup plus fréquemment que sur les basaltes de la phase II sur lesquels le matelassage cendreux est plus épais. Cela a évidemment une incidence importante sur la qualité des sols, qui, dans tous les cas, sont développés sur les cendres plus récentes.

L'âge de la phase III est hypothétique, peu de datations fiables ayant été faites. On peut estimer qu'elle s'étale entre -35 000 et -12 000 ans. Le «tuf jaune», niveau repère des pyroclastites du Piton des Neiges, n'y a jamais été observé.

2.3.4 Phase IV

Il s'agit essentiellement des remplissages hors-caldera les plus récents, ayant dévalé jusqu'à la mer, de la Plaine des Palmistes et de la Plaine des Cafres. Ce sont des coulées basaltiques alternant coulées «aa» et «pahoehoe»

(ces dernières surtout en amont des Hautes-Plaines).

Ces coulées, outre leurs situations particulières, montrent une faible altération (exception faite d'une brunification sensible dans les parties scoriacées entre le Tampon et St Pierre) ; d'autre part, contrairement aux basaltes des phases précédentes, ceux de la phase IV sont très faiblement recouverts de cendres (poches de moins de 50 cm d'épaisseur) et montrent donc énormement d'affleurements (photos A.48 et A.49).

Des critères comparables de faible altération et de faible saupoudrage cendreux, nous ont amenés à classer en phase IV, dans le sud de l'île, toute la série d'épanchements issus des gros cônes de scories associés à d'importants saupoudrages de lapilli, situés entre la Ravine des Cafres et Basse-Vallée. Ces édifices volcaniques sont greffés sur des coulées de phase I(à l'ouest de la Rivière des Remparts) ou de phase III (entre la Rivière des Remparts et Basse Vallée). Certains de ces cônes sont sortis en mer (Grande Anse, Vincendo). Une falaise littorale, au niveau de Saint Joseph, a été fossilisée par les déversements des coulées de cette phase IV.

Appartiennent à la phase IV une grande partie des cônes de scories de la Plaine des Cafres d'où se sont échappées les laves qui sont descendues jusqu'à la mer, recouvrant des coulées des phases I et II ainsi que, plus en aval, les dépôts des nuées ponceuses issues du Piton des Neiges.

Côté nord-oriental, les coulées de phase IV ont rempli la Plaine des Palmistes ; certaines, provenant de la Plaine des Cafres, ont dévalé l'escarpement de la Grande-Montée ; d'autres sont sorties de cônes de la Plaine des Palmistes elle-même ; ces épanchements se sont dirigés vers la mer se joignant aux coulées des cônes de Grand-Etang et de Piton-Armand. Au sud de Saint-Benoît les basaltes ont recouvert le cône de déjection ancien (à début d'altération ferrallitique) de la Rivière des Marsouins. Ces coulées se sont appuyées, en aval de Grand-Etang, contre le massif disséqué du Cratère constitué de vieux basaltes du Piton des Neiges (Phase II).

2.3.5 Phase V

A l'intérieur de la 2è caldera, remplie par les basaltes de la phase III (ces derniers en ayant largement débordé) s'est emboîtée une autre structure d'effondrement et de glissement ouverte sur la mer côté E-SE selon un angle d'environ 75 ° . Les témoins bien conservés des remparts de cette pseudo-caldera sont, au nord, l'escarpement de la Ravine Constantin et au sud, l'escarpement de Basse-Vallée. Ces 2 remparts, qui sont probablement les cicatrices de cisaillement de vastes glissements, délimitent les coulées de la phase III à recouvrements cendreux assez épais et les coulées de la phase V sans recouvrement cendreux (donc pratiquement sans sol). Ces dernières, à leur tour, enserrent les Grandes Pentes et le Grand Brûlé remplis par les coulées actuelles. La séparation se situe au niveau des remparts du Tremblet et de Bois-Blanc correspondant à la «pseudo-caldera» de glissement actuelle des Grandes Pentes et du Grand Brûlé de la Fournaise (P. BACHELERY, 1.981).

Les basaltes de cette phase V constituent le revers du rempart de Bellecombe où ils sont en partie couverts de lapilli. Dans le Fond de la Rivière de l'Est et dans la Plaine des Sables, ils recouvrent les coulées de la phase III mais ils disparaissent sous des coulées de la phase VI (actuelle). La coulée de vallée de la Rivière des Remparts (coulée du Commerson) pourrait dater de cette période. Il en est de même de la coulée récente étroite qui dévale le panneau de la phase III au niveau de la Crête.

L'âge de cette phase V peut être estimé entre 8 000 et 5 000 ans. Elle se termine par la formation de la Sème caldera (Enclos Fouqué) et le glissement progressif des Grandes Pentes vers l'est ouvrant cette caldera sur la mer en une pseudo-caldera limitée par les remparts de cisaillement sub-parallèles du Tremblet et de Bois-Blanc.

2.3.6 Phase VI

Cette dernière phase correspond aux volcanismes actuel et sub-actuel, de moins de 5 000 ans. Elle a bâti le sommet actuel de la Fournaise (2 632 mètres) avec ses cratères du Bory et du Dolomieu (photo A.64) ; la phase VI concerne essentiellement les remplissages de la caldera de l'Enclos Fouqué (3ème caldera) et de la pseudo-caldera qui la prolonge à l'est constituant le Grand Brûlé, les Grandes Pentes et la Plaine des Osmondes

(photo A.65).

Des éruptions hors enclos ont cependant été fréquentes, recouvrant des coulées antérieures : Fond de la Rivière de l'Est, Plaine des Sables dominée par de gros édifices (Chisny, Piton du Cirque...), nombreuses coulées superposées aux coulées de la phase V, d'une part entre Basse-Vallée et le Rempart du Tremblet, d'autre part entre le Rempart de Bois-Blanc et le Rempart de la Ravine Constantin.

Dans la Ravine Langevin, une coulée a dévalé jusqu'à la mer. Des sorties ont eu lieu au nord et au sud de Sainte Rose (coulée de 1.977 à Piton Sainte Rose, photos A.68 et A.69).

2.3.7 Les pyroclastites

En dehors des multiples cônes scoriacés, le massif de la Fournaise a émis une quantité appréciable de lapilli et de cendres basaltiques. Celles-ci sent en général d'autant plus épaisses que les basaltes qu'elles recouvrent sont anciens. Ce critère nous a d'ailleurs servi à «caler» la chronologie relative et la répartition spatiale des différentes phases. On peut établir approximativement les correspondances suivantes.

Au-dessus de 1 500 mètres d'altitude, les corrélations sont moins bonnes car les conditions de piégeage et de maintien des cendres diminuent en même temps que la couverture végétale se raréfie. Dans la zone à éricacées, seules les cendres les plus récentes subsistent. En dessous de 500 mètres, les cendres sont systématiquement moins épaisses car la mise en culture a favorisé un certain décapage.

TAB. 2.2 – *Estimation de l'épaisseur des cendres et de la pierrosité des sols à la Fournaise en fonction des phases géologiques*

Phase	1	2	3	4	5	6
Epaisseur moyenne des cendres entre 1.000 et 1.500 m. d'altitude	2 à 3 m.	1 à 2 m.	0,5 à 1,5 m.	0,20 à 0,50 m	0	0
Affleurements rocheux Vente (blocs et gratons) entre 1.000 et 1.500m. d'altitude	très peu nombreux	peu nombreux	nombreux	très nombreux	généralisés	

Dans les parties sommitales de la Fournaise, au-dessus de 1 700 mètres d'altitude, P. BACHELERY (1.981) a reconnu, grâce aux datations C 14 sur bois carbonisés, un certain nombre d'épisodes cendreux :

- autour de 9 400 ans ;
- autour de 8 000 ans ;
- autour de 7 125 ans ;
- autour de 3 200 ans ;
- autour de 2 220 ans.

Ce dernier épisode, dit des «Cendres de Bellecombe» a eu une ampleur importante. Il s'agit de cendres de teinte gris-clair emballant des lapilli accrétionnés, des «balles de boue» et des tufs vésiculés (P. BACHELERY, 1.981) permettant d'identifier une origine phréatique pour ces explosions avec une mise en place associant retombées aériennes et «déferlantes basales». Les «Cendres de Bellecombe» s'observent tout autour du rempart de l'Enclos Fouqué entre le nez coupé du Tremblet et le nez coupé de Sainte Rose.

Tous ces dépôts cendreux possèdent quelques passages de lapilli. Cependant, il y a eu, postérieurement aux Cendres de Bellecombe, des épisodes (sub-actuels) à lapilli dominants, composés d'éléments vitreux scoriacés

millimétriques à centimétriques. Au moins 3 périodes peuvent être identifiées et rattachées probablement à quelques gros édifices explosifs comme le Cratère Commerson, le Piton du Cirque et le Chisny. Les 2 premières sont liées à d'importantes couches de «lapilli jaunes» (légère altération par oxydation et hydratation du fer) :

- Sur le revers ouest de la caldera des Sables, entre le Rempart des Sables et l'escarpement de la Plaine des Palmistes, et jusqu'en contrebas du Nez de Boeuf. Ce nappage daterait d'environ 1 890 ans.
- Sur le revers ouest du Rempart de Bellecombe, en particulier sur le versant qui descend vers le fond de la Rivière de l'Est. Ces lapilli sont datés de 1 450 ans.

Le dernier épisode (du Chisny), encore plus récent, a saupoudré de fins lapilli non altérés (gris-noir) la Plaine des Sables.

2.4 Les matériaux détritiques et formations superficielles (hors pyroclastites)

Nous les citerons simplement pour mémoire. Elles seront étudiées en détail par la suite. Il s'agit :

- des brèches détritiques des cirques,
- des coulées boueuses («lahars»),
- des alluvions anciennes (anciens cônes de déjection),
- des «alluvions à galets» récentes (grands cônes de déjection),
- des «alluvions à galets» actuelles des lits majeurs,
- des ennoyages argilo-limoneux des plaines littorales,
- des piégeages alluvio-cendreux des hautes plaines,
- des sables éoliens (basaltiques ou madréporiques) des amas et cordons littoraux.

Chapitre 3

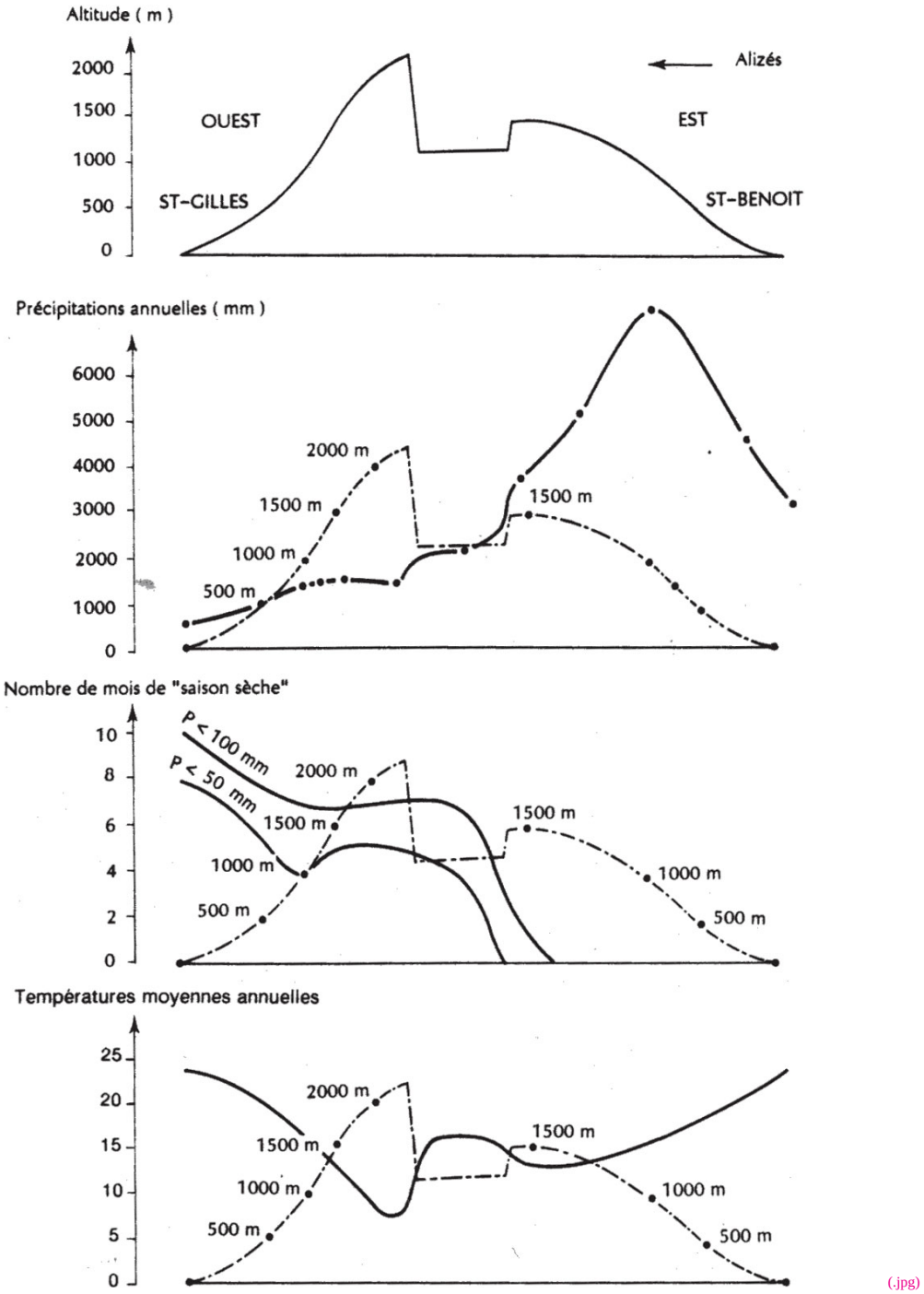
LE CONTEXTE CLIMATIQUE

La Réunion doit son climat contrasté à (Fig. 3.1) :

- sa situation océanique,
- sa latitude australe assez basse,
- la «compacité» de son orographie et son altitude élevée.

Les deux traits dominants en sont, d'une part un régime assez régulier d'alizés (vents d'est dominants) créant une zone «au vent» et une zone «sous le vent» (Fig. 3.3 et Fig. 3.4), d'autre part un régime de «perturbations tropicales» parfois violent et destructeur (cyclones) plus irrégulier et difficilement prévisible.

FIG. 3.1 – *Altitude - Climat : coupe schématique de l'île (Saint Gilles - Saint Benoît)*



(.jpg)

3.1 Les grands traits de la circulation atmosphérique

Les masses d'air océaniques qui influencent la Réunion sont :

- l'air tropical maritime de l'océan Indien : 21 à 24 ° au sol, humidité relative de 70 %,
- l'air tropical maritime de l'océan Atlantique : 15 à 20 ° au sol, forte humidité relative (80 à 85 %),
- l'air maritime équatorial, chaud et humide, avec environ 27 ° au sol et 75 à 80 % d'humidité relative,
- l'air supérieur, au-dessus de l'air tropical maritime, commençant entre 1 000 et 2 500 mètres d'altitude, et qui est caractérisé par sa sécheresse,
- l'air polaire, froid, qui peut influencer l'île pendant l'hiver austral.

Les centres d'action barométriques

Ces masses d'air sont soumises à des circulations par l'interaction de hautes et de basses pressions :

- la zone des basses pressions équatoriales : son minimum barométrique correspond à «l'équateur thermique» dont le déplacement de part et d'autre de l'équateur géographique est lié au mouvement apparent du soleil. Cette ceinture oscille entre 20 ° N (été boréal) et 15 ° S (été austral). Elle définit la zone de convergence intertropicale (ZCIT) caractérisée par ses masses pluvio-nuageuses.
- la zone des hautes pressions subtropicales : elle est constituée par deux centres anticycloniques principaux : l'anticyclone du Cap et l'anticyclone des Mascareignes (ou de l'océan Indien) entre 30 et 40 ° de latitude sud. Entre les deux, de petites cellules de hautes pressions mobiles se détachent de l'anticyclone du Cap pour se diriger d'ouest en est.
- les basses pressions polaires : situées plus au sud, entre 50 et 65 ° , elles peuvent également former des cellules qui se déplacent d'est en ouest, véhiculant des perturbations

C'est essentiellement l'évolution et l'interaction des basses pressions équatoriales et de l'anticyclone de l'océan Indien qui conditionnent le régime pluviométrique de l'île. Le régime d'alizé, qui souffle des hautes vers les basses pressions, est dévié par les forces de Coriolis et il arrive sur La Réunion suivant une direction dominante ESE/WNW. L'alizé, chargé d'humidité, subit en arrivant sur l'île, une ascendance forcée contre les reliefs, avec détente et condensation, générant des «pluies orographiques» sur la façade «au vent» (Fig. 3.3 et Fig. 3.4). Cet air, lorsqu'il redescend de l'autre côté (face «sous le vent»), se comprime et se désature (effet de foehn), assurant un temps plus sec et ensoleillé.

En réalité ce schéma simple est modulé suivant la saison et souvent contrarié par des fronts et perturbations. En effet l'activité et la position des centres barométriques évoluent pendant l'année :

- pendant l'hiver austral «frais» (15 avril-15 novembre) : la ceinture des basses pressions équatoriales avec son air chaud et humide est située au nord de l'Equateur (environ 20 ° N) alors que l'anticyclone de l'Océan Indien est proche de la Réunion (au sud-est, vers 30-35 ° de latitude). Ce dernier, très actif, génère un fort régime d'alizé (30 à 60 km/h) dont l'humidité se décharge sur la face «au vent». Tant que l'alizé est soutenu et non perturbé, il fait beau et sec sur le versant ouest où c'est la saison sèche. Dans l'île c'est également la saison «fraîche» car à cette époque, l'air polaire se rapproche. Quand l'anticyclone de l'océan Indien se décale vers l'est, l'alizé ralentit et les cellules secondaires de hautes pressions qui se détachent de l'anticyclone du Cap, s'affaiblissent, laissant passer («cols» barométriques) l'air froid et humide en provenance des basses pressions polaires. Ces perturbations de sud rafraichissent le temps et amènent des pluies, surtout dans le sud et l'ouest de l'île.
- pendant l'été austral «chaud» (15 novembre-15 avril), tous les centres d'action se décalent vers le sud. La zone de convergence intertropicale à air chaud et humide descend sous l'équateur (15 ° sud) et se rapproche donc de la Réunion. L'anticyclone de l'océan Indien, affaibli, est rejeté vers le sud est (40 ° sud). Le régime d'alizé donne alors des vents moins forts et plus irréguliers, mais toujours chargés d'humidité

qui précipite par l'ascendance orographique. Ce régime d'alizé subit des perturbations en provenance des basses pressions équatoriales qui apportent d'intenses précipitations, des vents violents et de fortes houles. Ces perturbations tropicales qui se détachent de la ZCIT A.3 (grâce à la force de Coriolis) peuvent évoluer en énormes tourbillons à fort gradient barométrique, appelés cyclones. Les dépressions arrivent le plus souvent par le nord et l'est (Fig. 3.5), mais les pluies intéressent toute l'île. Les cyclones ont des trajets complexes imprévisibles. Pour que l'on parle de cyclone, il faut que les vents dépassent 63 noeuds (117 km/h); ils peuvent atteindre 300 km/h lorsque la bande spiralée est ultra concentrée.

3.2 Les pluies

3.2.1 Typologie et classification des différents régimes de pluies

R. ROBERT (1.986) a fait une analyse typologique très intéressante et une classification génétique des différents régimes de pluies de La Réunion. Pour cela, ROBERT a analysé les bulletins climatiques mensuels (BCM) de 82 stations de Météo-France sur 23 ans (1.958-1.980). Le «noyau dur» de cette classification en est le régime d'alizé («type A») qui apporte des pluies orographiques.

Ce régime d'alizé qui est à l'origine des zones au vent et sous le vent, est, rappelons le, conditionné par l'interaction des centres de basses pressions équatoriales et de hautes pressions tropicales (anticyclone de l'océan Indien). L'alizé est fort et bien établi en hiver lorsque l'anticyclone de l'océan Indien est proche de l'île ; il est affaibli mais encore présent en été lorsque cet anticyclone est repoussé vers le sud par la descente de la ZCIT.

L'alizé peut être perturbé par l'arrivée de masses pluvio-nuageuses qui sont le fait :

- soit d'une perturbation tropicale venant du nord (ZCIT) et amenant de l'air chaud et humide. Ce sont les pluies de «type B» (en été austral).
- soit d'une perturbation venant du sud et amenant de l'air frais et humide passage d'un front froid non dépressionnaire ou d'une dépression frontale (associée à un front froid), ou bien, plus rarement, d'une dépression non frontale. Ce sont les pluies de «type C». Elles peuvent survenir à toute époque de l'année, mais davantage durant l'hiver austral.

En dehors des pluies B et C, d'autres perturbations porteuses de masses pluvio-nuageuses peuvent arriver sur l'île. Elles se forment dans l'ouest et le sud-ouest de l'Océan Indien. ROBERT a appelé ces pluies de «régime pluvio-nuageux particulier», les pluies de «type D». Il y en a 2 sortes :

- les pluies par «ondulation d'alizé» : la masse nuageuse orientée N/S se crée par ondulation de la paroi équatoriale de la cellule anticyclonique. Les nuages et les pluies arrivent sur l'île par l'est (onde d'est).
- les pluies se formant à la rencontre de 2 masses d'air (front) créant un axe d'instabilité. Le plus courant est la rencontre des hautes pressions avec une petite dépression secondaire.

Enfin ROBERT (1.986) définit un régime de «type E». Il apparaît lorsque, pour une raison quelconque, les régimes précédents (A, B, C) sont affaiblis (faibles gradients barométriques), donnant un régime de faible circulation, instable, pouvant aller jusqu'à la convection libre avec brise de mer (ouest surtout). Celle-ci génère donc, comme pour le type A, des «pluies orographiques» qui se forment par ascendance de l'air humide sur les reliefs de l'île.

Les pluies de type E peuvent être qualifiées, suivant les cas, de EA, EB, ou EC. Cela dépend de l'origine du régime affaibli dont elles dérivent. La situation EA est la plus fréquente. La situation EB est génératrice de pluies orageuses de forte intensité.

Finalement, les pluies d'alizé (A), de perturbations tropicales (B) et de perturbations de sud (C) sont les 3 régimes fondamentaux, relativement indépendants les uns des autres. Ils formeront les totaux les plus importants. Les régimes D et E en dérivent généralement : les pluies D résultent, pour une grande partie d'entre elles, du régime A (ondulations d'alizé) ; les pluies E résultent d'une faible circulation (affaiblissement) des régimes A, B ou C.

Les pluies A et E sont les «pluies de circulation» (dépendance orographique) alors que les pluies B, C et D sont les «pluies de perturbation», qui amènent des masses pluvio-nuageuses sur l'île, celles-ci pouvant seulement être renforcées au contact des reliefs.

Ces différents régimes ont des «poids» variables dans les totaux pluviométriques, dans l'espace et dans le temps. D'autre part ils n'ont pas tous les mêmes distributions régionales et saisonnières. Enfin ces régimes montrent des variations interannuelles également différentes.

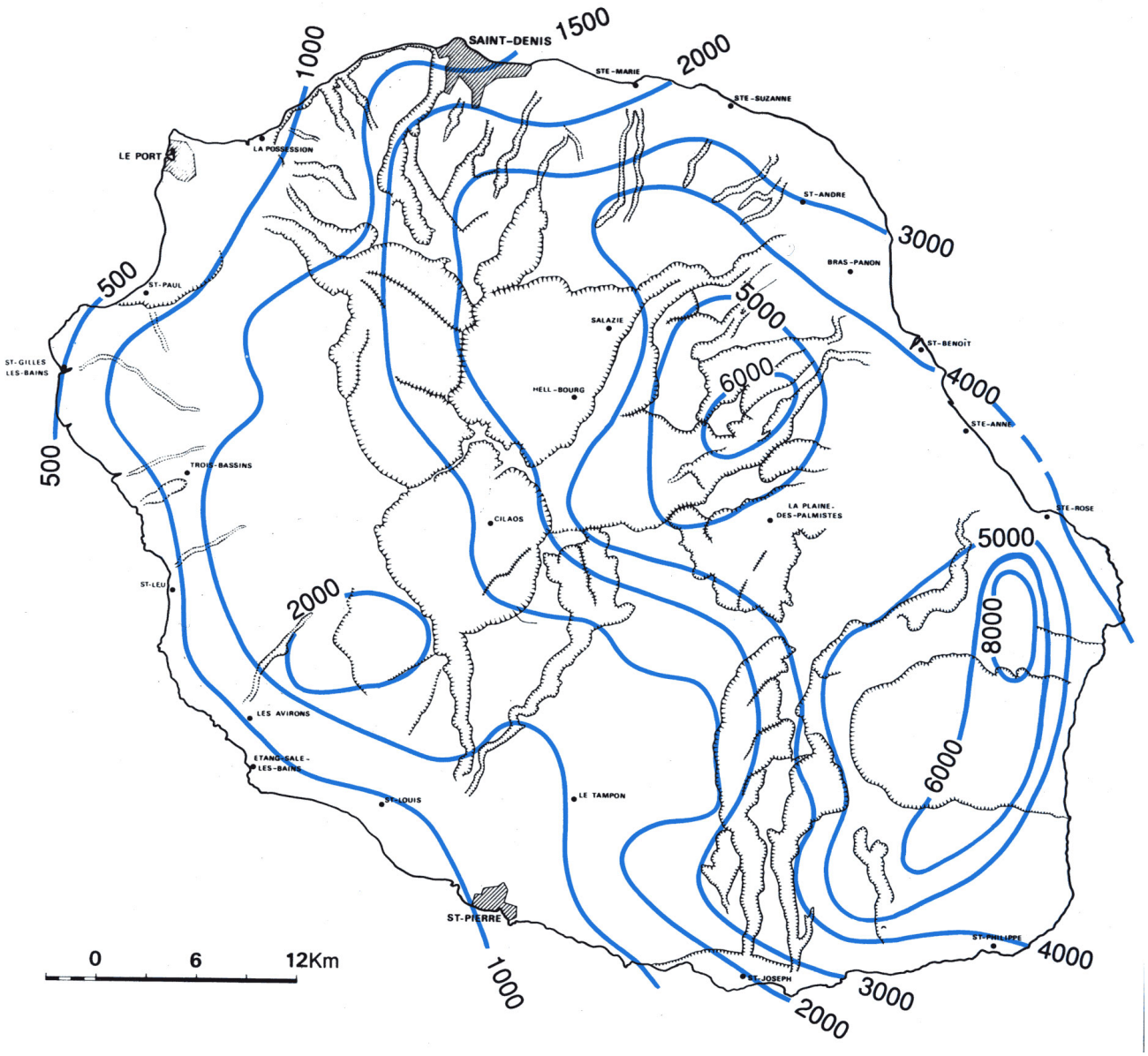
3.2.2 Distributions régionales des moyennes annuelles

Le tableau 3.1 résume les résultats des dépouillement opérés par ROBERT. Il différencie, d'une part l'est et l'ouest de l'île, d'autre part, les totaux pluviométriques annuels et les nombres de jours de pluies revenant à chacun des régimes définis précédemment, avec les altitudes de leurs maxima «radiaux».

TAB. 3.1 – *Totaux annuels des 5 régimes de pluies en fonction de l'exposition (D'après R. ROBERT)*

		Tous régimes confondus	Type A (Alizés non perturbés)	Type H (Perturbations tropicales)	Type c (Perturbations de sud)	Type D (Régimes pluvio-nuageux particuliers)	Type E (Faible circulation convection libre)
SITUATION ATMOSPHERIQUE	Nombre jours	365	173	31	48	17	97
	%	100	47,5	8,4	13,1	4,6	26,4
AU VENT *Pluies moyennes annuelles	P(mm)*	2000-8000	500-4500	500-2200	400-1300	200-1000	L500-1000
	Nombre de jours	150-250	50-130	20-25	25-35	12-15	20.60
	%	41-68	14-36	5-7	7-10	3-4	5-16
	Altitude du maximum pluviométrique	1500	1600	Maximum dans les encaissements	800	800-1000	1200
SOUS LE VENT	P(mm)*	600-2000	50-500	200-1000	150-500	100-200	100-300
	Nombre de jours	50-150	10-50	12-20	10-25	7-13	10-30
	%	14-41	3-14	3-5	3-7	2-3	3-8
	Altitude du maximum pluviométrique	1500	1400	Maximum dans les encaissements	1400	1000-1200	1400

FIG. 3.2 – *Pluviométrie moyenne annuelle (en mm) période 1.958-1.980*



(.jpg)

La limite entre les régions «au vent» et «sous le vent» coïncide à peu près avec l'isohyète moyenne annuelle de 2 000 mm (Fig. 3.2). Si on ne se réfère qu'aux pluies d'alizé (type A), régime le plus discriminant, cela correspond à l'isohyète 500 mm ; au nord, cette limite passe par Sainte Marie, au sud par Vincendo.

Dans l'est, il y a 2 maxima nets : 6 000 mm à l'amont de la Rivière des Marsouins, et 8 000 à 9 000 mm dans les Hauts de Sainte Rose. Le record a été enregistré à Takamaka (alt. : 800 m) en 1.959 avec 11 693 mm et dans les Hauts de Sainte Rose (alt. : 860 m) en 1.982, avec 15 000 mm.

Dans l'ouest, un maximum pluviométrique (2 000 mm) s'observe à La Plaine des Makes.

La région la plus sèche de l'île est le littoral ouest compris entre La Possession et Saint-Pierre, avec moins de 1 000 mm. Le Port et Saint Gilles-Les-Bains ne totalisent que 500 mm.

Ce sont les pluies A (pluies d'alizé non perturbé) et les pluies B (perturbations tropicales) qui contribuent le plus aux moyennes pluviométriques annuelles. Dans l'ouest (sous le vent) les pluies de perturbations tropicales contribuent davantage que les pluies d'alizé ; c'est l'inverse dans l'est.

Il faut noter qu'à toute séquence pluviométrique radiale (selon les plus grandes pentes) correspond un maximum pluviométrique : ce «seuil» altitudinal est de 1 400-1 500 mètres sur les planèzes occidentales de l'île et de 1 600 mètres sur les versants est. Au-dessus, on observe une diminution sensible des pluies d'alizés. Ce seuil dépend de l'épaisseur de l'air tropical maritime humide des hautes pressions de l'océan Indien, qui est mobilisé par l'alizé (photo A.7). Cette couche d'alizé a une épaisseur de 1 000 à 2 500 mètres. La couche supérieure des cellules anticycloniques est beaucoup plus sèche.

En plus de cette «pluvio-toposéquence» sur les planèzes en pentes générales relativement régulières (sans encaissements marqués), il faut noter que la répartition des pluies d'alizés est également dépendante des effets de déviation, de canalisation et de bloquage de leur circulation dans les gouttières, encaissements et grands remparts qui hachent le relief (Fig. 3.11). Ces accidents, s'ils ont des orientations adéquates, peuvent ainsi renforcer l'efficacité pluviométrique de l'alizé.

Distribution saisonnière

Tous régimes de pluies confondus et cumulés, la région sous le vent (Sainte Marie à Vincendo, par l'ouest) subit une saison sèche» marquée, de mai à novembre. Pendant cette même période la région au vent ne présente qu'un ralentissement des pluies.

Pour être plus précis, il faut distinguer :

- le nombre de mois à moins de 50 mm, dits «mois secs»,
- le nombre de mois à moins de 100 mm, dits «mois peu pluvieux».

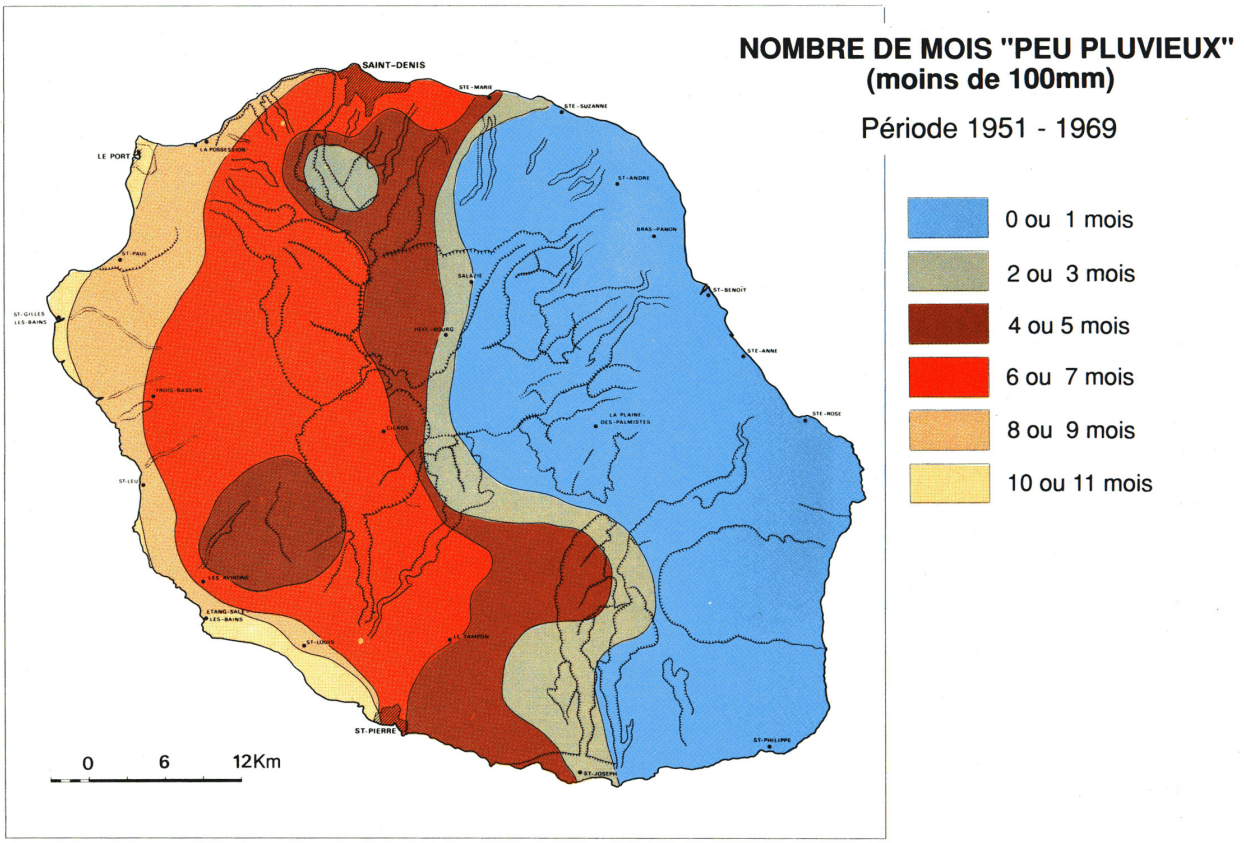
La Fig. 3.3 et la Fig. 3.4 montrent les nombres de mois «secs» et «peu pluvieux» sur l'ensemble de l'île. On voit que la région «au vent» ne montre pas de mois secs et que la limite «2 mois peu pluvieux» démarque assez bien les 2 façades. Le littoral ouest, de Saint Denis à Saint Pierre, possède 5 à 8 mois «secs» et 8 à 11 mois «peu pluvieux» (record à Saint Gilles-Les-Bains).

D'autre part, il est intéressant de voir comment se répartissent durant l'année «moyenne» les différents apports pluviométriques des 5 régimes définis par ROBERT (1.986), et quelles sont leurs contributions à la pluviométrie moyenne.

Les précipitations totales moyennes mensuelles

Sur la façade «au vent»

FIG. 3.3 – *Nombre de mois «peu pluvieux» (moins de 100 mm) Période 1.951 1.969*



(.jpg)

La moyenne annuelle comprise entre 2 000 et 8 000 mm, présente :

- une saison très pluvieuse, du 15 novembre au 15 avril, avec généralement plus de 200 mm par mois, pendant laquelle on observe 2 maxima, l'un en janvier, l'autre en mars, de 500 à 900 mm chacun, séparés par un creux relatif qui tend à s'estomper au-dessus de 1 000 mètres d'altitude.
- une saison moins pluvieuse, du 15 avril au 15 novembre, avec quand même 100 à 300 mm par mois et avec un minimum en septembre-octobre.

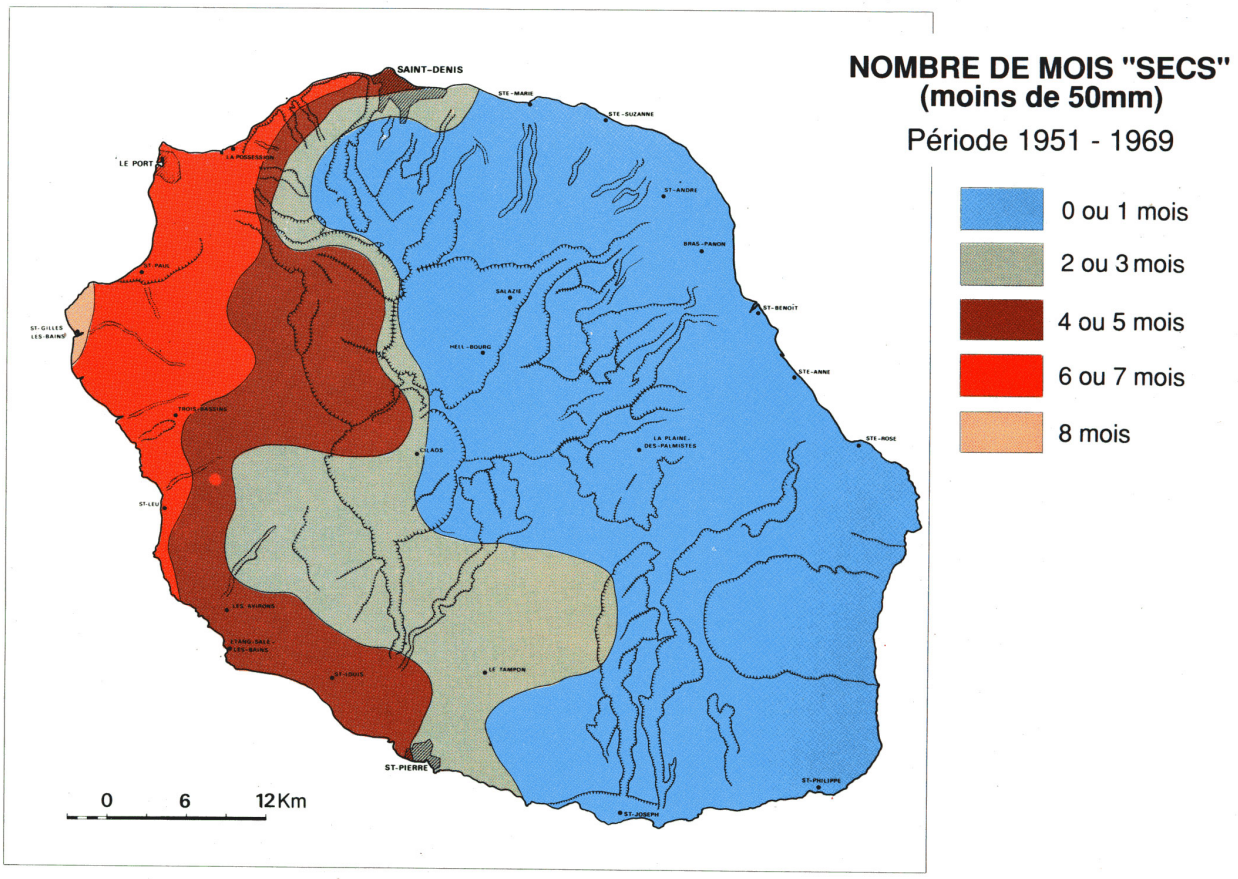
Sur la façade «sous le vent»

La moyenne annuelle est comprise entre 500-550 mm (Le Port) et 2000 mm. Il y a 2 saisons tranchées :

- une saison des pluies, du 15 décembre au 15 avril avec plus de 100 mm à 300 mm par mois (sauf sur le littoral, entre La Possession et Saint Pierre). Pendant cette période, on observe encore les 2 maxima, en janvier et en mars jusqu'à 900 mètres d'altitude. Au-delà ils n'en font qu'un,
- une saison sèche, du 15 avril au 15 décembre, avec moins de 100 mm mensuels. Les mois de juillet, août, septembre et octobre sont les plus secs (moins de 50 mm), les minima étant en septembre et octobre.

Les contributions séparées (moyennes mensuelles) des différents régimes de pluies

FIG. 3.4 – *Nombre de mois «secs» (moins de 50 mm) Période 1.951 1.969*



(.jpg)

– **Façade «au vent»**

  – concernant les pluies d'alizés (type A), celles-ci sont toujours supérieures à 500 mm pendant l'année, pour dépasser 4 000 mm (Hauts de Sainte Rose et de Bois-Blanc). Elles tombent durant toute l'année. Le «grand maximum» se situe toujours en avril (50 à 300 mm). Il y a 3 pics moins importants, avec par ordre décroissant : juillet, janvier et novembre. Les minima se situent en décembre et en septembre/octobre.
  – les pluies de perturbations tropicales (type B) totalisant 600 à 2 000 mm suivant les régions, sont beaucoup plus concentrées pendant l'année ; elles tombent entre décembre et mars avec un pic maximum très net en janvier (200 à 600 mm) et un deuxième en mars. Le creux, très relatif, de février disparaît à partir de 1 000 mètres d'altitude. En dessous de 1 000 mètres, ce sont donc les pluies B qui expliquent les 2 pics de janvier et mars des précipitations moyennes et totales, mentionnées précédemment. De décembre à mars, les pluies de dépressions tropicales sont supérieures aux pluies d'alizés. Par contre, elles sont pratiquement inexistantes pendant le reste de l'année.
  – les pluies de perturbations de sud (type C) d'origine polaire totalisent 400 à 1 300 mm. Les régions les plus arrosées par ces pluies sont les mêmes que pour les alizés (Hauts de Saint Benoît et Hauts de Sainte Rose). Les grands maxima s'observent en avril et en novembre (70 à 130 mm) ; un maximum secondaire est en juillet (30 à 90 mm). Les minima sont en août/septembre/octobre et pendant les mois chauds de la saison cyclonique, de décembre à mars. Les pluies C sont généralement inférieures aux pluies d'alizé sauf en novembre. Plus on se rapproche de la côte sous le vent, plus les pluies de perturbations polaires tendent à avoir autant d'importance que les pluies d'alizé. Sur le versant ouest, les pluies C dominent généralement les pluies A.
  – les pluies D, qui résultent essentiellement, de perturbations dans le courant d'alizés (ondulations d'alizé), totalisent 200 à 1 000 mm avec les 2 mêmes pôles régionaux de maxima que pour les alizés non perturbés à savoir, le bassin de la Rivière des Marsouins et les Hauts de Sainte Rose. C'est du 15 décembre au 15 avril que tombent ces pluies (avec un creux en janvier). Le minimum est en août/septembre/octobre.
  – les pluies de faible circulation (pluies E) avec 100 à 1 000 mm, montrent encore des maxima régionaux dans les Hauts de Saint Benoît et de Sainte Rose. La situation la plus fréquente est celle qui dérive d'un affaiblissement des flux d'alizé. Les pluies E gardent donc ici à peu près la même structure spatio-temporelle que les pluies A. La période la plus arrosée par ces pluies orographiques est 15 novembre-15 avril, avec un minimum relatif en janvier.

– **Façade «sous le vent»**

  – les pluies d'alizé sont inférieures à 500 mm pendant l'année. Elles augmentent avec l'altitude jusqu'à un maximum qui se situe vers 1 400/1 500 mètres. Les alizés, vidés en grande partie de leur humidité sur les versants au vent sont donc moins «efficaces» sur la façade occidentale d'autant plus que s'ajoutent les effets de foehn. Ces pluies tombent de décembre à mai, avec un maximum principal en avril et un maximum secondaire en janvier. Contrairement aux versants nord, est et sud-est, ici les pluies d'alizé sont toujours très faibles en saison fraîche (généralement moins de 20 mm par mois), sauf dans la zone littorale de Saint-Pierre, directement soumise aux alizés de sud-est, qui reçoit 20 à 40 mm par mois de mai à octobre.
  – les pluies de perturbations tropicales, avec 200 mm (Saint Gilles-Les Bains) à 1 100 mm annuels (1 800 mètres) tombent de décembre à mars. Elles sont, pendant cette période, toujours très supérieures aux pluies d'alizé. Les pics de maxima sont les mêmes que sur les versants au vent, c'est-à-dire janvier et mars. Les hauteurs les plus impressionnantes tombent généralement dans les Cirques de Mafate et de Cilaos qui, si on doit les rattacher en partie à la zone «sous le vent», y représentent des cas très particuliers d'influences orographiques.
  – les pluies de perturbations de sud (pluies C) représentent un apport, relativement important, de 150 à 500 mm annuels. Cet apport est surtout sensible en dehors de la période cyclonique, spécialement en saison «sèche» où il est généralement supérieur aux pluies d'alizés (ce qui est l'inverse sur le versant «au vent»). On observe 2 maxima, l'un en avril, l'autre en novembre/décembre. Il y a un minimum en février et un autre, relatif, en septembre.

- les pluies D (perturbations d'alizés surtout) ne représentent que 100 à 200 mm du total pluviométrique. Elles n'interviennent significativement que de décembre à avril avec 2 maxima : décembre et mars. De mars à octobre, elles sont quasiment nulles.
- les pluies de faible circulation (pluies E) totalisent 100 à 300 mm pendant l'année. L'ouest est soumis à une convection libre (brise de mer) plutôt qu'à un régime de faible circulation des alizés comme dans l'est.'Le maximum s'observe en saison chaude comme pour les alizés. De mai à novembre, ces pluies sont insignifiantes.

Les dépressions et cyclones tropicaux.

Les dépressions tropicales et cyclones prennent naissance, pendant l'été austral, dans la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Des noyaux dépressionnaires pluvio-nuageux s'en détachent et prennent peu à peu une allure spiralée par rotation, autour de l'«oeil», dans le sens des aiguilles d'une montre (pour l'hémisphère sud). En plus de cette rotation, le météore se déplace dans son ensemble (10 à 25 km/h) selon une trajectoire imprévisible dans le détail (globalement du NE vers le SW). Sa taille peut faire plusieurs centaines de kilomètres.

L'OMM parle de «dépression tropicale» lorsque les vents sont inférieurs à 63 noeuds, soit 117 km/h, et de «cyclone» lorsque les vents sont supérieurs à 63 noeuds. En cas de concentration maxima, la vitesse du vent peut atteindre 160 noeuds (300 km/h). Différents systèmes de classification existent que nous ne détaillerons pas ici.

Quand le météore se rapproche de la Réunion, il commence par perturber le régime d'alizé. Les pluies augmentent partout dans l'île de façon «anormale» ; on rentre alors dans le régime B de ROBERT. Les alizés ainsi perturbés et renforcés ne subissent pas encore de changements de direction. Lorsque le cyclone se rapproche davantage, le régime d'alizés est oblitéré. La circulation affecte une face au vent très arrosée, alors que sous le vent il pleut peu. Enfin, lorsque le cyclone est sur l'île les pluies sont générales, avec des maxima «au vent», en altitude (renforcement par ascendance orographique) et dans les grands encaissements.

La perturbation tropicale peut être dangereuse (photos A.55 et A.60) par ses vents (force destructrice directe) et par ses pluies (inondations, chasses d'eau, coulées boueuses, éboulements). Pluies et vents ne vont pas forcément ensemble. Il peut y avoir des «cyclones secs» à vents très violents et des dépressions, qui, par leur durée, amènent des précipitations record («avalasses») pas toujours de très forte intensité. Ces dernières peuvent être plus à craindre que les cyclones rapides car, par leurs pluies, elles sursaturent les matériaux.

Les trajectoires des cyclones (Fig. 3.5)

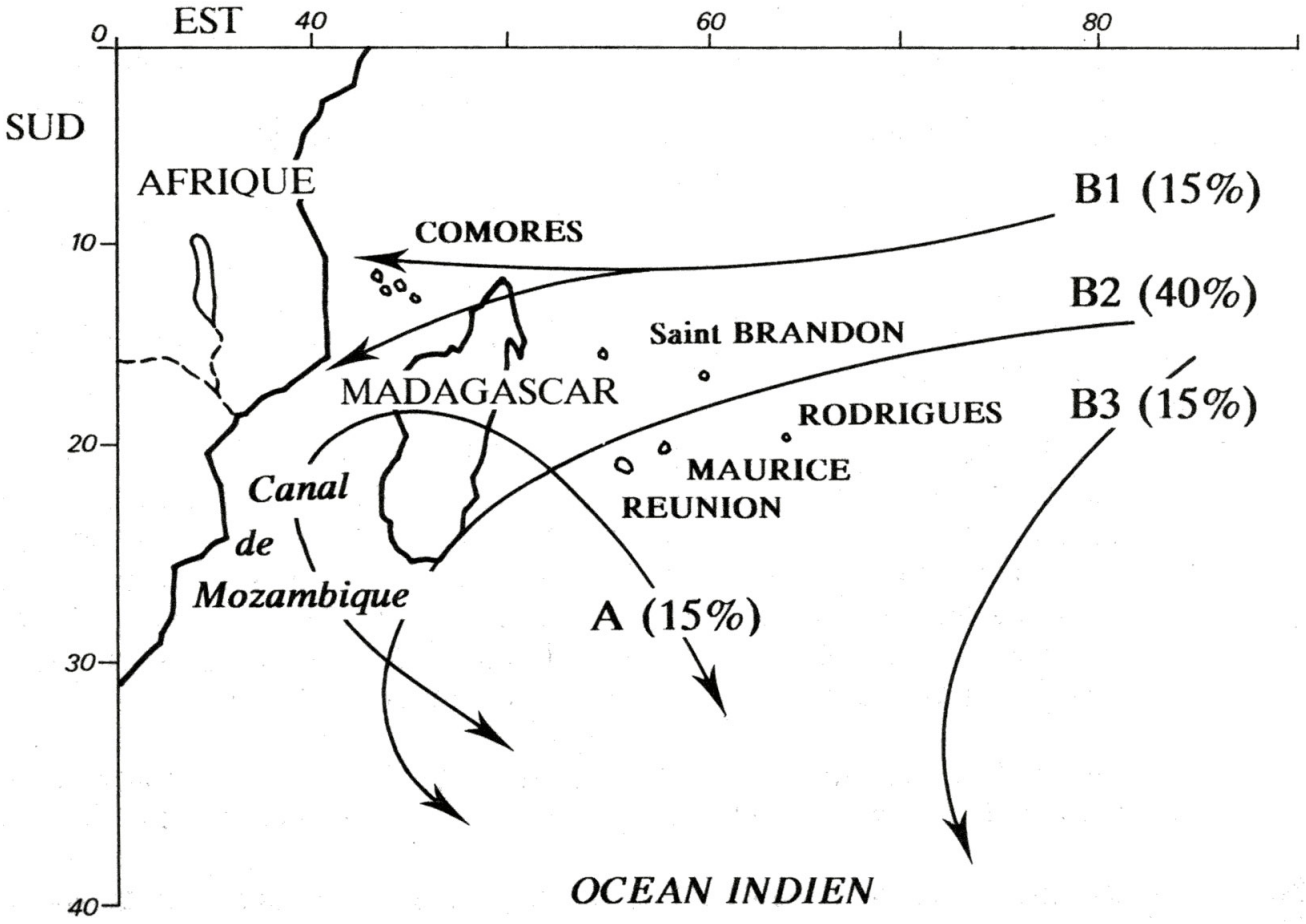
Après leur sortie de la ZCIT, les tourbillons se déplacent du SE vers le SW (forces de Coriolis) suivant des trajectoires diverses.

Sur l'ensemble des perturbations tropicales qui influencent la Réunion, 35 à 40 %, au stade de vrai cyclone, abordent la Réunion par le NE suivant une direction NE-SW. Ils ont lieu en janvier, février ou mars. Environ 10 arrivent (encore par l'est) en début d'été austral c'est-à-dire en novembre ou décembre et restent le plus souvent au stade dépression. Toujours par l'est, 15 % peuvent arriver en fin de saison (mars-avril), mais elles sont peu virulentes car elles obliquent vers le sud avant d'atteindre l'île. Le restant est «atypique», soit issu du Canal du Mozambique (15 %), soit hors saison, soit à trajectoire très complexe. Plus encore que les autres régimes pluviométriques, celui des dépressions tropicales et cyclones est extrêmement irrégulier. Les moyennes des «pluies B» cachent la réalité des variations interannuelles et saisonnières.

Ainsi, entre 1.958 et 1.980, le rapport M/m (coefficient d'irrégularité) des pluies B maxima aux pluies B minima varie de 16 à 136. Par exemple, à La Plaine des Palmistes, M = 4 740 mm, m = 180 mm, M/m = 26,3. A Gillot, M = 1 320 mm, m = 25 mm, M/m = 52,8. A Aurère, M = 6 280 mm, m = 70 mm, M/m = 89,7.

Pendant cette période, sur presque toute l'île, l'année 1.967 a été la plus «sèche» en pluies B et l'année 1.980, la plus arrosée. L'année 1.980 a été l'année de «Hyacinthe», qui en 13 jours a vu des pluies diluviennes record. La moitié des stations de l'île ont alors enregistré un montant supérieur à la moyenne normale annuelle. Il est

FIG. 3.5 – *Directions dominantes et fréquences des cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'océan Indien d'après Malick et Mercusol*

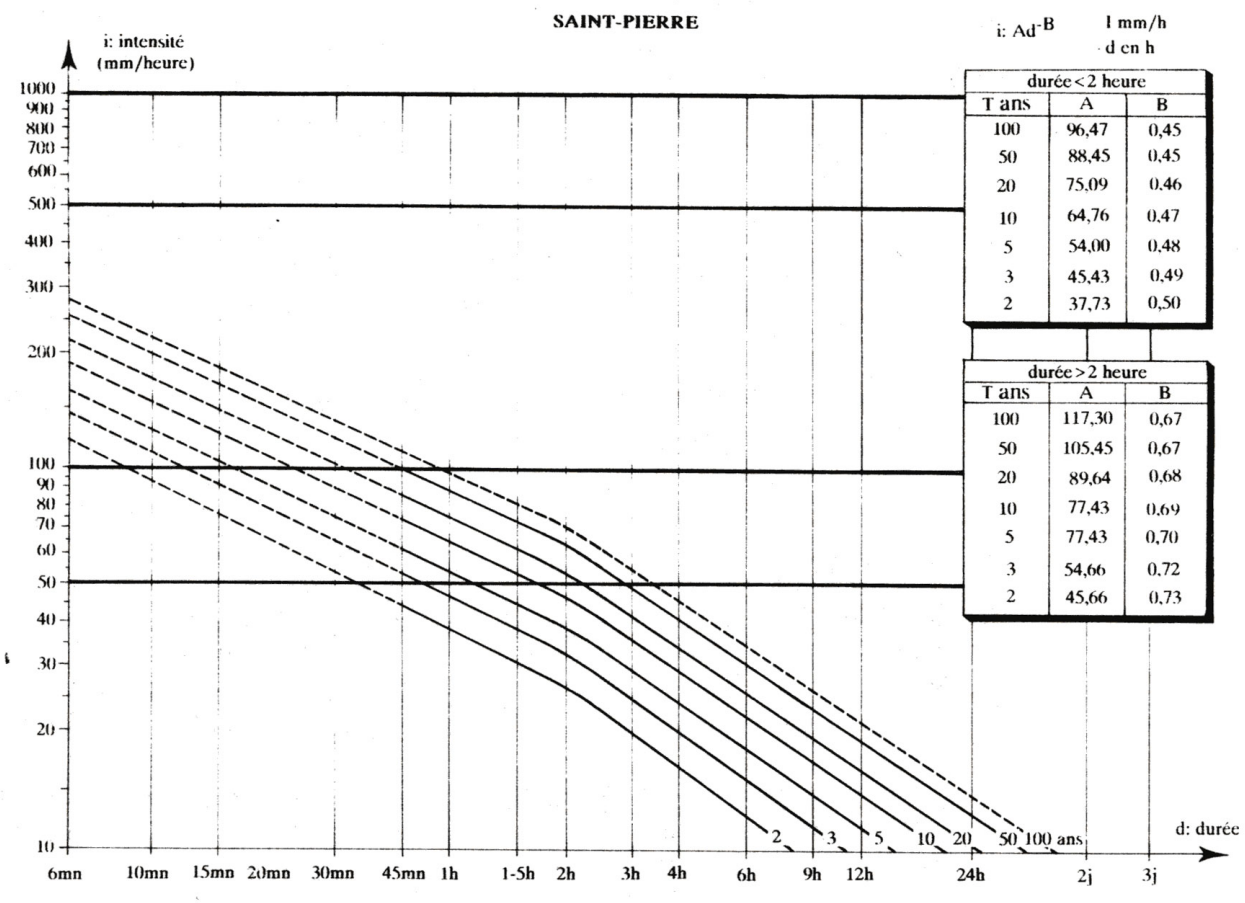


(.jpg)

tombé par exemple 6 527 mm à Commerson et 5 295 mm à Grand Ilet pendant ces 13 jours ! A Saint Denis, il est tombé 450 mm en 5 jours.

Pourtant il faut signaler que Hyacinthe était une dépression tropicale forte et non un cyclone proprement dit. Les vents n'ont pas été excessifs, ni les pressions très basses. Ce qui a «compté» est le nombre de jours sans interruption avec des pluies fortes causant des coulées boueuses (Grand Ilet). Le cyclone «Firinga» de 1.988, à l'opposé, a été relativement peu pluvieux et c'est le vent très fort qui a causé le plus de dégâts (région de Saint Pierre).

FIG. 3.6 – *Graphe intensif durée - fréquence des averses (Bessette et Duret -1.987)*



(.jpg)

Les intensités de pluies

L'analyse des pluviogrammes et hyétogrammes des stations permet de relever les totaux pluviométriques pendant des périodes de temps plus ou moins resserrées. Les intensités sont exprimées en mm/h. L'intensité instantanée est difficile à mesurer. C'est pourquoi les intensités de références s'expriment en intensité (mm/h) pendant des laps de temps donnés. Ce qui est important concernant l'énergie cinétique des pluies est la durée de persistance de leur intensité. La valeur de référence comparative est souvent l'intensité maxima (en mm/h) durant 30 minutes. Le tableau 4 suivant indique quelques maxima en 30 mn enregistrés de 1.958 à 1.982.

La valeur extrême mesurée jusqu'à présent est celle de Cilaos le 2 mars 1.963, avec 413 mm/h pendant 30 mn.

BESSETTE et DURET (1.985) ont dépouillé et analysé statistiquement les pluviogrammes d'une vingtaine de stations de l'île sur 15 à 30 ans. Par ajustement à la loi de Gumbel, ces auteurs ont établi des abaques donnant intensités maxima, durées et fréquences (en années de retour). Les intensités ont été calculées pour des durées d'averses de 30 mm, 45 mm, 1 h, 1 h30, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, 72 h. Les périodes de retour étaient : 2 ans, 3 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans.

Les durées inférieures à 30 mn ont été estimées par extrapolation des courbes. Nous donnons à la figure 3.6 un exemple de ces abaques.

Le tableau 5 reprend les valeurs statistiques et estimations de 16 stations de l'île, concernant les intensités maxima en 6 mn, 30 mn et 24 heures avec fréquences de 2 à 100 ans.

On constate que ce sont les cirques, en particulier Cilaos, mais aussi probablement Mafate (Aurère) et Salazie (Grand Ilet) qui, sur 30 mn, présentent les averses à intensités maxima. Puis vient la zone du volcan (Bellecombe), ensuite, les versants NE, E et SE ainsi que les hautes plaines centrales (Plaine des Cafres, Plaine des Palmistes) et les «hauts» de l'ouest (Carreau Alfred). Les zones les moins touchées par les fortes intensités sont la zone sud-ouest (Saint Pierre) et surtout les régions nord-occidentales de basse et moyenne altitude (de Gillot à Etang Salé).

Ainsi l'intensité de 100 mm/h en 30 mn aura une fréquence d'apparition de l'ordre de :

- tous les 3 ans à Cilaos,
- tous les 4 ans à Bellecombe,
- tous les 5 ans à Menciol, Hts de Sainte Rose, Saint Philippe, Plaine des Cafres, Carreau Alfred,
- tous les 10 ans à la Plaine des Makes,
- tous les 20 ans à Saint Pierre,
- tous les 40 ans à Gillot, Saint Denis, Savannah,
- tous les 50 ans à Bois de Nèfles,
- tous les 100 ans au Port.

- Les maxima en 24 heures consécutives :

les pluies maxima annuelles en 24 heures s'observent partout en saison chaude (novembre à avril). Elles ont pour origines les régimes dépressionnaires tropicaux et cyclones (pluies B).

Ainsi sur 80 stations (ROBERT, 1.981) :

- 36 % ont leur maximum/24 h en janvier
- 26 % ont leur maximum/24 h en mars
- 17 % ont leur maximum/24 h en février
- 12 % ont leur maximum/24 h en avril
- 7 % ont leur maximum/24 h en novembre
- 1 % ont leur maximum/24 h en décembre.

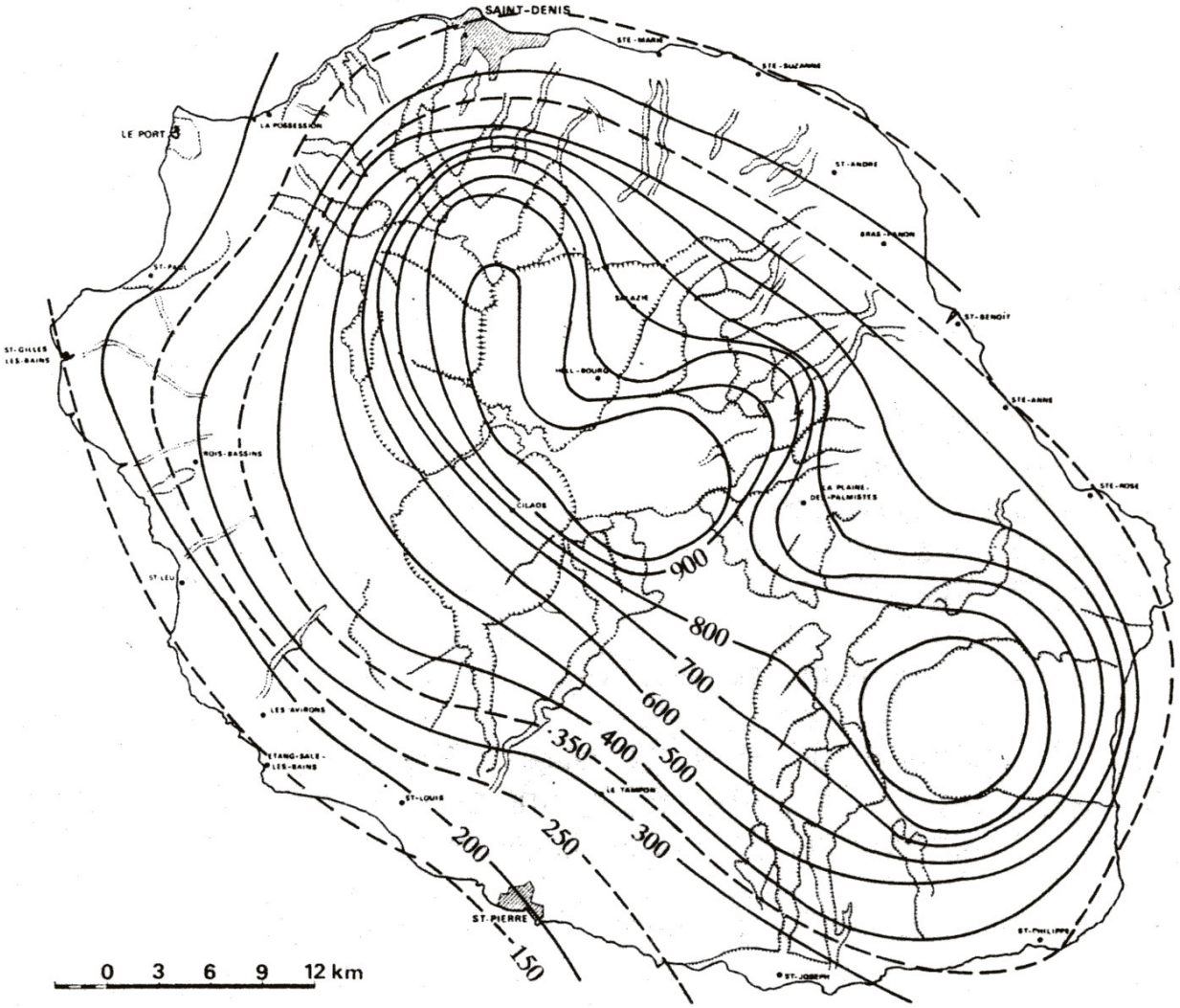
Les max/24 heures de saison fraîche (mai à octobre) sont des pluies de régimes C, D ou A (plus rarement). Une forte proportion (50 %) de ces maxima arrive en octobre.

Voici quelques records enregistrés parmi les valeurs supérieures à 1 000 mm (citées par R. ROBERT, 1.981) :

- Belouve (28/02/64) = 1 688,8 mm
- Piton Tortue (8/11/66) = 1 474 mm
- Aurere (17/3/58) = 1 315,3 mm
- Grand Ilet (2/77) = 1 290 mm
- Plaine des Cafres = 1 250 mm (7/1/66)
- Cilaos (28/2/64) = 1 160 mm
- Foc Foc (janv. 60) = 1 150 mm
- Commerson (7/1/66) = 1 140 mm
- Bras Sec (7/1/66) = 1 115 mm
- Hellbourg (28/2/64) = 1 100 mm
- Takamaka (20/12/61) = 1 067 mm
- Grand Pays (janv. 60) = 1 035 mm

La figure 3.7 est la carte des isohyètes de l'averse maxima de 24 heures (7h à 7 h) avec une fréquence de 10 ans. On vérifie que les zones les plus arrosées (plus de 600 mm) sont les cirques, le volcan et les hautes

FIG. 3.7 – *Hauteur de l'averse de 29 heures (période de retour 10 ans). (Étude des maxima annuels sur 70 stations de 1.952 à 1.980, ajustement à la loi de Cumbel)(D'après M. Duret -1.982)*



(.jpg)

plaines centrales (Plaine des Cafres, Fond de la Plaine des Palmistes, Bébour Bélouve), les encaissements des Rivières des Roches et des Marsouins (Takamaka, les hauts de l'est et du sud-est). Les zones les moins arrosées en 24 heures, avec moins de 300 mm, sont les plaines littorales de Saint Benoît à Saint Denis, ainsi que les versants inférieurs de l'ouest.

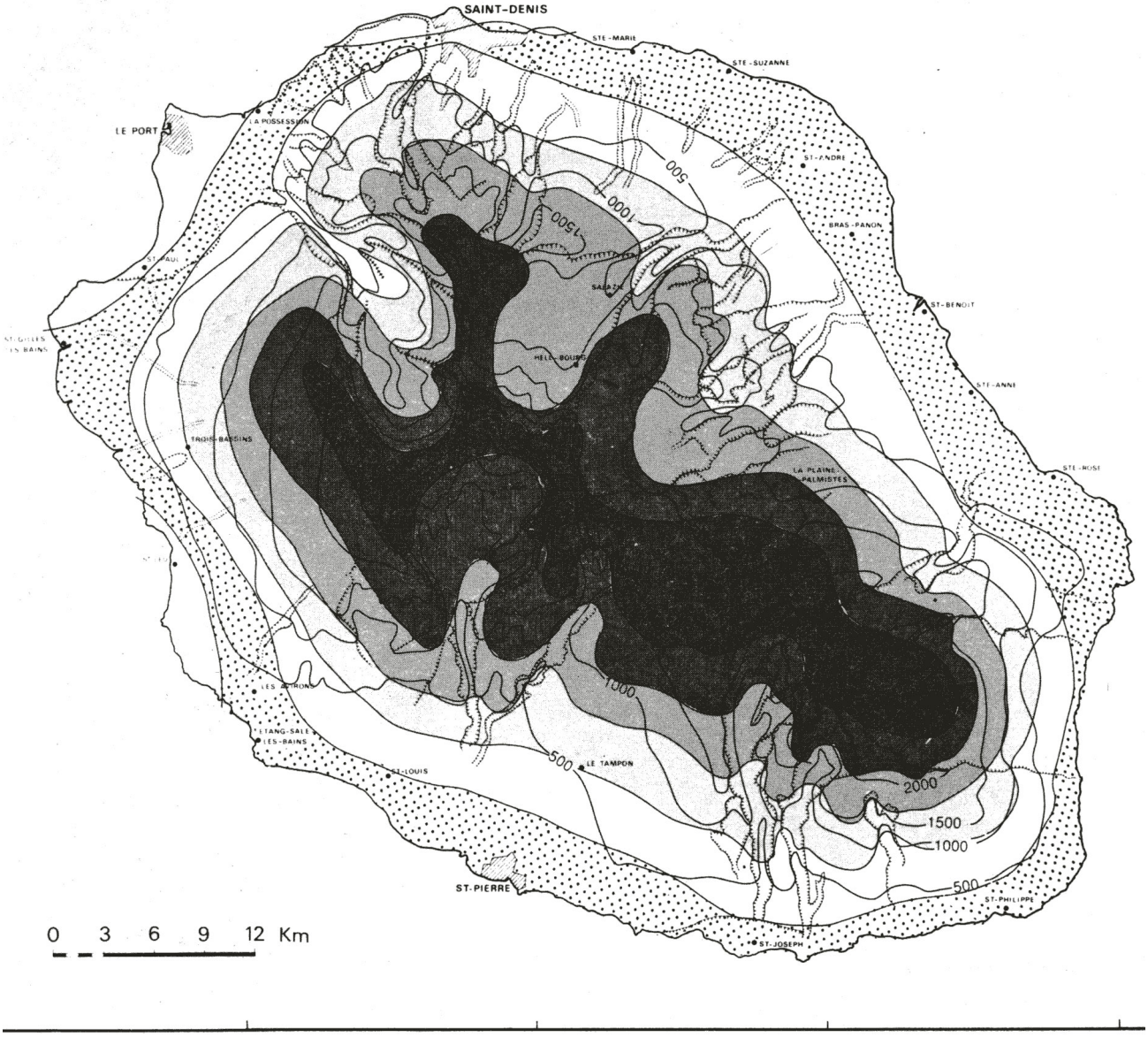
TAB. 3.2 – *Records d'intensité d'averses en 30 minutes enregistrés sur 19 stations de l'île*

STATION	ANNÉE	NB DE RELEVÉS	I max. / 30 min	PROBABILITÉ DE RETOUR
CILAOS	1963	18	413.2	plus de 400 ans
CARREAU ALFRED	1976	13	282.0	plus de 300 ans
PITON TORTUE	1980	13	237.3	plus de 300 ans
PLAINE DES CAFRES	1964	20	209.2	100 ans
BELLECOMBE	1982	17	189.9	90 ans
MENCIOL	?	20	160.0	50 ans
AURERE	1980	7	151.0	
SAINT PHILIPPE	1972	12	139.5	12 ans
PLAINE DES MAKES	1978	20	129.1	30 ans
GILLOT	1955	28	121.0	160 ans
HAUTS DE SAINTE ROSE	1981	10	120.9	10 ans
GRAND ILET	1979	8	119.2	8 ans
LIGNE PARADIS	1980	13	119.0	50 ans
SAINT DENIS	1965	19	113.3	120 ans
SAINT PIERRE	1980	27	108.6	35 ans
SAVANNAH	1961	20	91.6	20 ans
HELLBOURG	1978	8	64.9	
BOIS DE NEFLES	1977	10	60.8	4 ans
LE PORT	1974	9	60.0	9 ans

TAB. 3.3 – *Estimations statistiques des intensités maxima (mm/h) et fréquences de retour (années) des averses* durant 6mn, 30 mn, et 24 heures pour 16 stations de l'île. D'après BESSEÎTE et DURET - 1.985. Ajustement à la loi de GUMBEL sur 20 à 30 ans

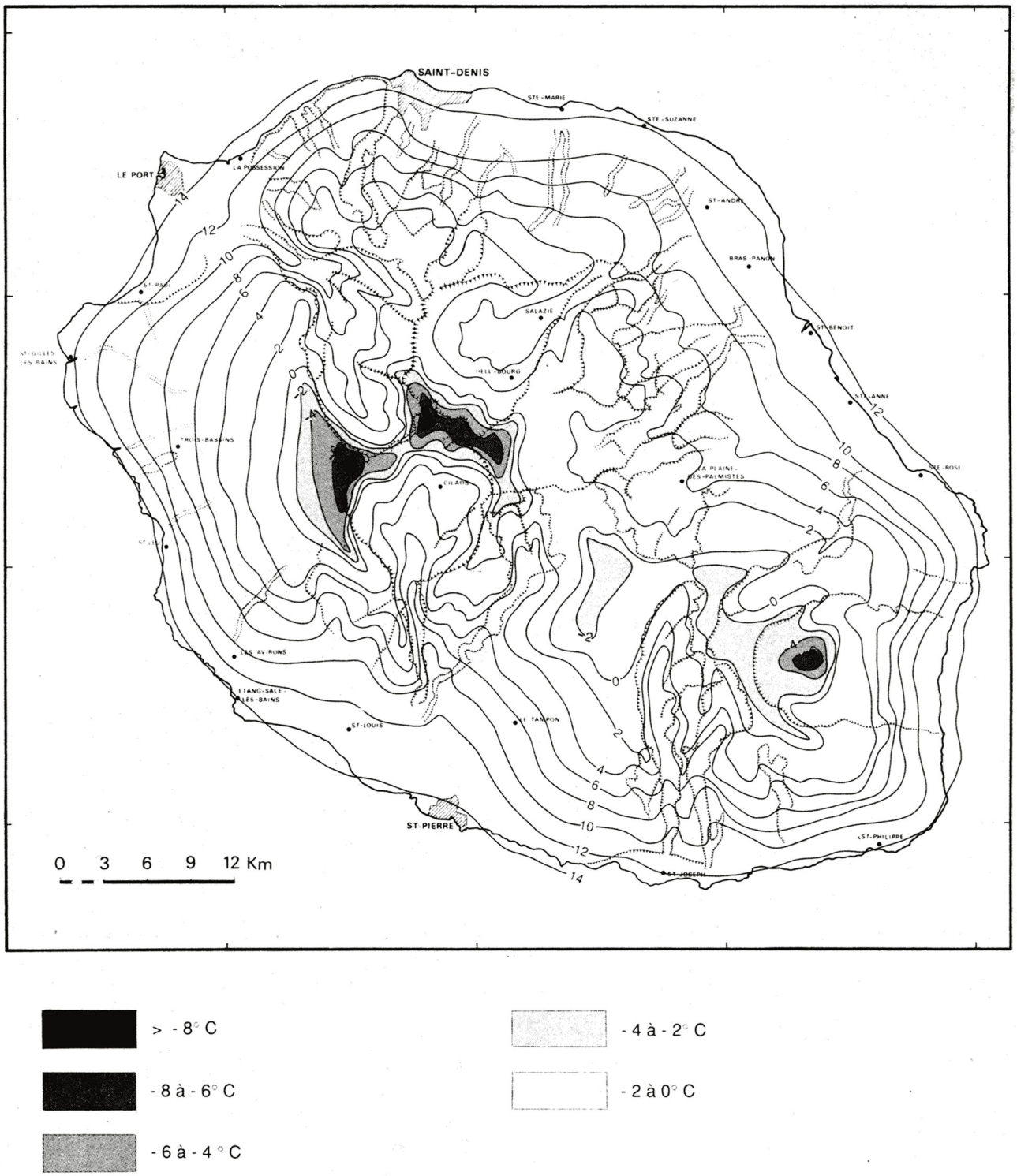
Fréquence Station	Retour 2 ans	Retour 3 ans	Retour 5 ans	Retour 10 ans	Retour 20 ans	Retour 50 ans	Retour 100 ans
Gillot	94 54 7	102 61 9	115 70 10	135 80 13	145 91 15	160 105 18	170 112 20
Saint Denis	108 55 6	130 63 9	145 71 9	165 82 10	190 90 12	208 105 15	250 112 16
Le port	58 32 5	75 41 7	92 50 8	110 62 10	135 74 12	160 90 15	180 100 16
Savannah	150 54 4	175 61 5	190 70 5	220 81 6	250 92 7	280 105 10	300 110 11
Bois de nèfles	85 48 7	98 56 9	110 66 10	135 77 16	155 86 13	175 100 19	200 105 22
Cilaos	150 80 17	180 102 25	220 130 28	270 155 37	330 180 63	400 225 54	450 255 62
Menciol	140 75 9	155 87 11	175 101 13	205 120 15	230 140 18	260 160 24	290 170 27
Ligne paradis	105 57 6	115 67 8	735 77 10	155 90 12	175 103 15	205 120 18	230 135 21
Hauts de Sainte Rose	110 78 20	125 95 26	145 105 28	765 125 35	180 150 40	210 170 47	235 190 53
Carreau Alfred	132 68 11	160 88 le	200 110 22	245 140 28	280 160 36	340 200 45	380 225 52
Piton tortue	88 58 18	107 75 28	125 90 33	158 108 42	185 130 52	225 155 65	250 170 70
Plaine des Cafres	115 66 15	145 85 24	165 105 27	220 125 36	260 155 44	310 190 55	350 215 62
Plaine des Makes	140 66 10	150 76 12	165 87 14	180 100 17	205 110 20	235 130 24	250 150 27
Bellecombe	130 77 20	145 92 26	160 115 30	180 130 36	210 155 42	250 175 52	270 200 57
Saint Pierre	120 55 4	140 67 6	155 78 7	180 90 9	210 102 12	250 125 15	275 140 17
Saint Philippe	120 70 10	150 85 13	185 100 15	210 125 18	250 150 22	300 170 26	340 190 31

FIG. 3.8 – *Températures moyennes annuelles*



(.jpg)

FIG. 3.9 – *Moyennes des températures minima absolus du mois le plus froid (15 juillet - 15 aout)*



(.jpg)

3.3 Les températures

Les températures et leurs variations à la Réunion, s'expliquent par la position de l'île assez basse en latitude, sa faible taille et l'influence océanique. Le mouvement apparent du soleil rythme les «saisons» :

- La saison la plus chaude (janvier, février, mars) correspond à une position de l'équateur thermique très au sud de l'équateur géographique. C'est l'époque où l'influence de l'air chaud et humide de la ZCIT est la plus marquée.
- La saison la plus fraîche (juillet, août, septembre) est celle pendant laquelle l'équateur thermique est le plus au nord de l'équateur géographique. C'est l'époque des alizés soutenus avec influences de l'air polaire plus proche qui s'injecte entre les cellules de hautes pressions.
- Les inter-saisons (octobre, novembre, décembre d'une part et avril, mai, juin d'autre part) correspondent à la «descente» ou à la «montée» du soleil de part et d'autre de l'équateur.

La forte influence océanique explique, en plus d'une latitude relativement basse, des températures moyennes assez «tempérées» et d'assez faibles amplitudes, pour une région tropicale.

Dans l'île, les différences régionales sont liées en premier lieu à l'altitude, puis dans une certaine mesure à l'exposition aux alizés et enfin, à des situations topographiques particulières : effets «d'ascendances» par convergence, effets de cuvette avec stagnation d'air froid, effets de foehn.

3.3.1 Les températures moyennes

Le tableau 3.4 indique les gammes de températures liées aux différentes tranches d'altitude.

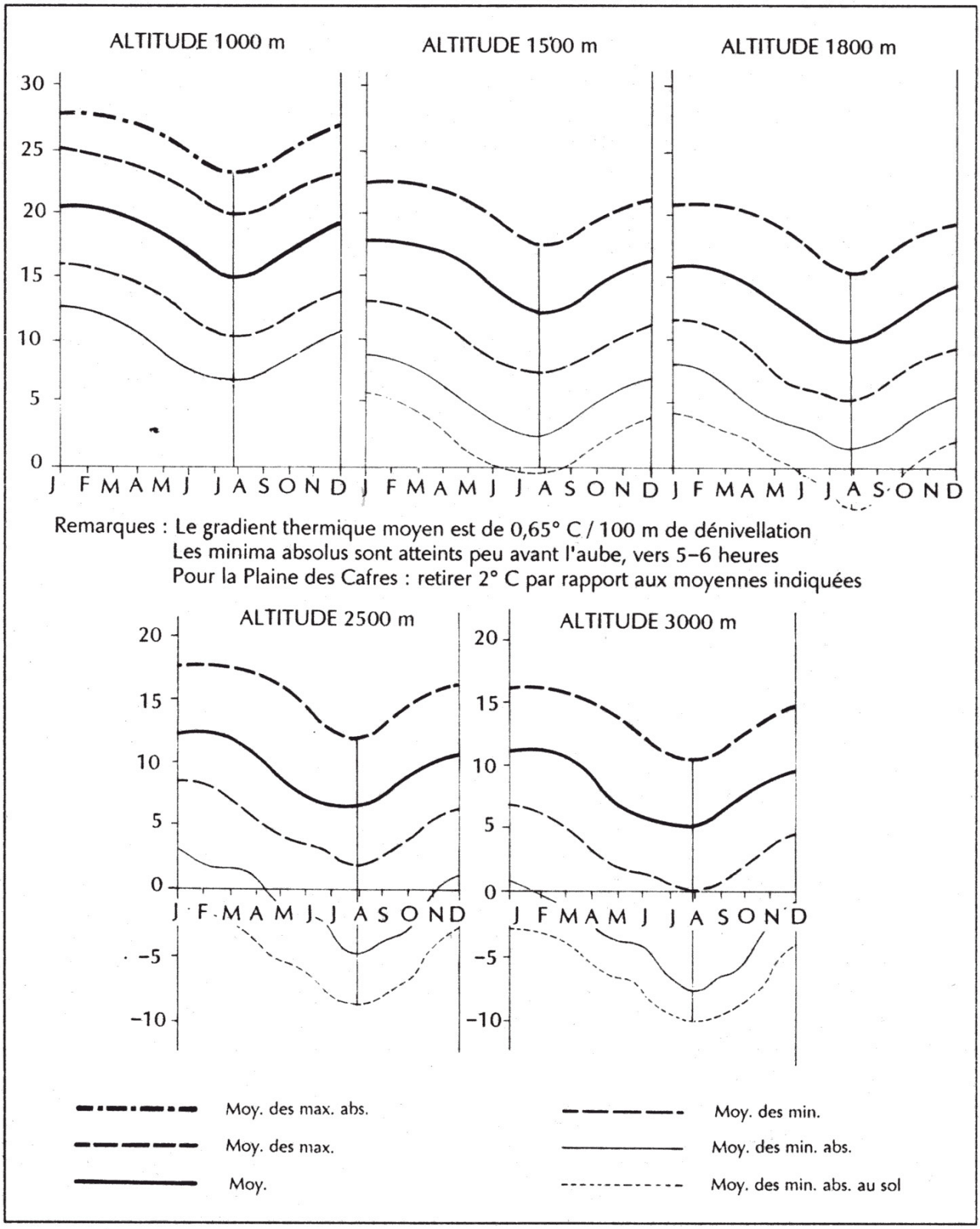
TAB. 3.4 – *Les températures en fonction de l'altitude*

	Moyennes annuelles	Moyenne des maxima	Moyenne des minima
0-100 mètres	23 ° à 26 °	27 ° à 29 ° 5	17 ° à 21 °
100-500 mètres	20 ° 5 à 23 °	24 ° 5 à 27 ° 5	15 ° à 19 °
500-1000 mètres	16 ° à 21 °	20 ° 5 à 26 °	11 ° à 16 °
1000-1500 mètres	14 ° à 17 °	19 ° à 21 °	9 ° 5 à 13 ° 5
1500-2000 mètres	12 ° à 17 °	17 ° à 19 °	7 ° à 10 °
Plus de 2000 mètres	Moins de 12 °	Moins de 17 °	Moins de 7 °

La figure 3.8 indique les isothermes des moyennes annuelles. La figure 3.10 donne les variations annuelles des températures moyennes, maxima, minima et absolues, entre 1 000 et 3 000 mètres d'altitude. On constate que :

- la région «sous le vent» (ouest) est plus chaude de 1 à 2 ° que la région «au vent».
- le gradient thermique moyen est de 0 ° 65 pour 100 mètres de dénivellation.
- les amplitudes annuelles des moyennes sont, quelle que soit l'altitude, de l'ordre de 5 ° 1.
- la moyenne des minima absolus au sol descend en dessous de 0 ° C à partir de 1 500 mètres d'altitude ; d'abord en août (1 500 m) puis de juin à octobre (1 800 m), enfin toute l'année (à partir de 2 300 m). On peut estimer qu'au sommet de l'île, au sol, la température peut atteindre -10 ° C (Fig. 3.9).

FIG. 3.10 – *Estimation des températures moyennes mensuelles entre 1 000 m et 3 000 m d'altitude*



(.jpg)

3.3.2 Quelques cas particuliers

- Dans les cirques : à altitudes semblables, la moyenne annuelle y est plus élevée d'environ 1 ° 5, par rapport aux pentes externes.
- A la Plaine des Cafres, il fait plus froid (d'environ 2 °) qu'à la même altitude ailleurs.
- Les températures maxima sont les plus élevées dans l'ouest, du Port (28 ° 3) à Etang-Salé (29 ° 2). Par contre c'est à Etang-Salé qu'on a relevé le plus faible minimum absolu (8 ° 8 en juin 1.967) de la côte ouest. Cette amplitude thermique annuelle d'Etang Salé, la plus élevée de l'ouest, peut s'expliquer par les sols et la situation topographique : les maxima plus élevés peuvent se comprendre par la présence de sables noirs qui absorbent la chaleur. Quand aux minima, ils peuvent s'expliquer par la descente et la stagnation d'air froid à partir de la «cuvette» de la Plaine des Makes en amont.

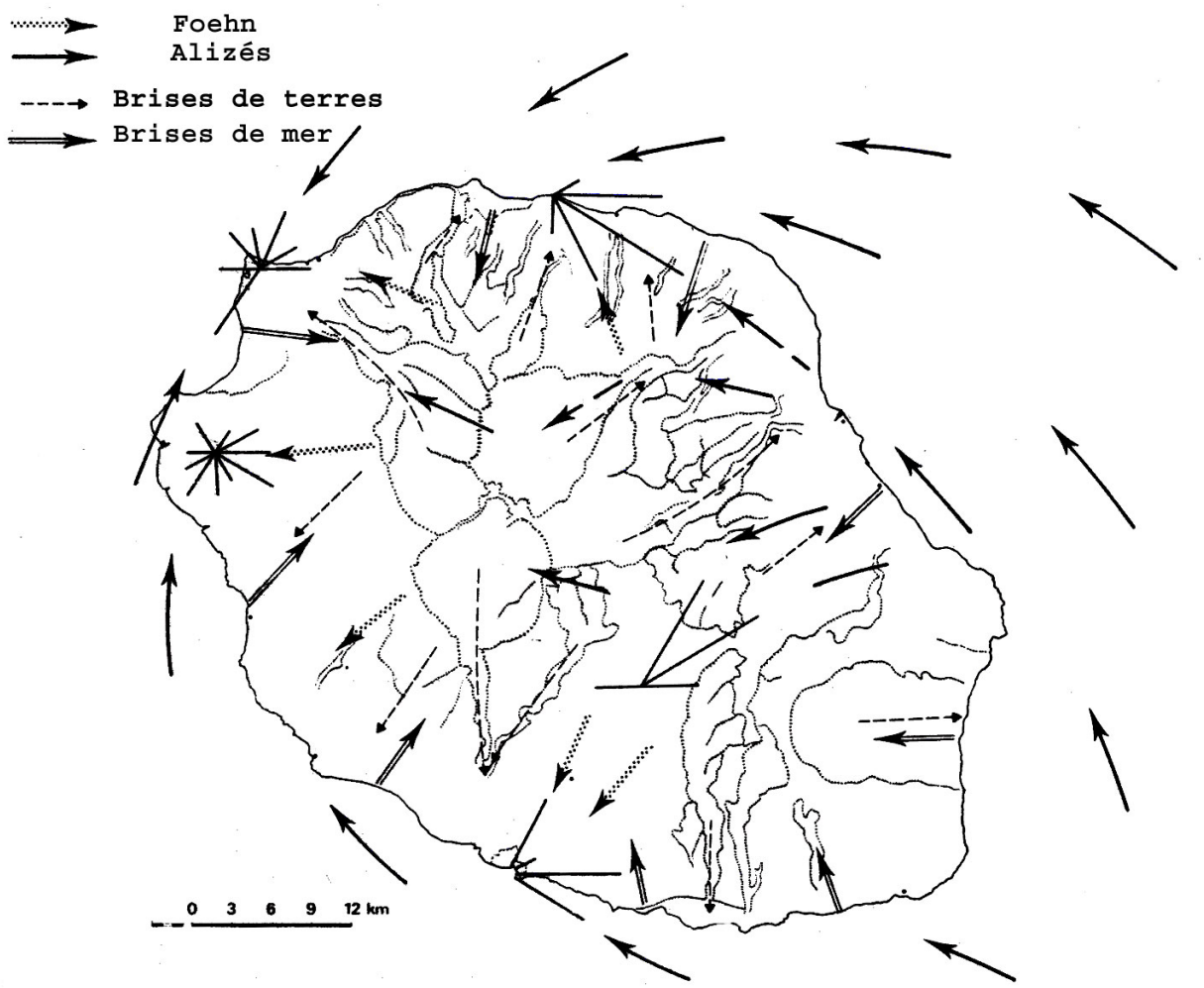
3.4 Les vents

Les vents à la Réunion (Fig. 3.11) ont pour origine les alizés d'est et sud-est. Les brises (brise de terre, brise de mer), localement les foehns. Ces vents constituent les régimes «réguliers», saisonniers ou journaliers. Ce sont des vents faibles à modérés, ne dépassant par 50 km/h. A côté de cela, il y a des vents «cycloniques» beaucoup plus irréguliers, violents, parfois destructeurs. Ils sont de courtes durées mais peuvent atteindre 250 km/h. Il n'existe des données directionnelles précises que pour 5 stations : Gillot, Saint Pierre, Le Port, Vue Belle et Plaine des Cafres.

3.4.1 Les alizés

Rappelons que cette circulation a pour origine l'interaction entre les hautes pressions tropicales (anticyclone de l'Océan Indien) et la zone de convergence intertropicale (MIT). En hiver austral, la cellule de hautes pressions est proche de la Réunion et le gradient barométrique est élevé ; les alizés sont alors forts et soutenus (par le sud-est). En été austral l'anticyclone est repoussé vers le sud, l'alizé est alors affaibli.

FIG. 3.11 – *Carte de la ventilation à la Réunion. Sur les roses des vents, ne sont indiquées que les directions où les observations sont supérieures à 5 %*



(.jpg)

Au contact de la Fournaise, les alizés venant du SE sont déviés par le nord et par le sud (Fig. 3.11), alors qu'une partie s'engouffre dans les gouttières de Salazie, de Bebour-Bélouve et de La Plaine des Palmistes. En redescendant les planèzes de l'ouest où il subit une compression, l'alizé desséché est à l'origine d'un effet de foehn jusqu'à mi-pente. Brise de terre (de nuit) et brise de mer (de jour) peuvent suivant les cas, renforcer ou amoindrir l'alizé. Les alizés ont des vitesses comprises entre 2 et 15 m / s (7 et 50 km/h), les plus fréquents étant 2 à 4 m/s (50 à 65 %). C'est en juillet, août et septembre qu'ils soufflent le plus fort. Les directions dominantes sont SE et E. Le Port, dans la zone la plus abritée, reçoit aussi des alizés mais ces derniers sont «affaiblis» du fait de leur déviation par le nord et par le sud les ayant fait contourner l'île (Fig. 3.11).

3.4.2 Les brises

Les brises sont des vents locaux dûs aux différences de température entre la mer et la terre. Pendant la journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, alors que pendant la nuit, la terre se refroidit fortement par rayonnement.

Le jour, sur terre, l'air chaud au contact du sol monte, donnant naissance à des courants de convection ascendants qui forment un appel à l'air marin plus froid. C'est la brise de mer.

La nuit, le processus s'inverse. L'air s'élève sur la mer, «aspirant» l'air froid plus dense de la terre qui s'écoule le long des reliefs. C'est la brise de terre.

Ces brises, qui sont sensibles toute l'année, ne peuvent se manifester que pendant les périodes de faible circulation des alizés. Les brises de terre nocturnes («vents de colline») sont les plus nettes car le régime d'alizé se calme. Ces brises de terre peuvent être amplifiées lorsqu'elles sont canalisées par de grandes ravines. De jour, la brise de mer se combine avec l'alizé souvent plus fort, qui impose donc sa direction. Les brises ont des vitesses faibles, généralement inférieures à 2 m/s.

3.4.3 Le foehn

Le foehn dérive des alizés lorsque ceux-ci redescendent «sous le vent» (subsidence), donc essentiellement dans l'ouest et le sud-ouest où il a la même direction que la brise de terre.

C'est entre la Plaine des Cafres et le Tampon que l'effet de foehn est le plus net. Mais on le trouve aussi sur les planèzes du Grand Benard, à la Montagne et à la Plaine des Fougères. Ce foehn est le plus sensible en saison fraîche lorsque les alizés sont eux-mêmes forts et soutenus. En général, leur influence ne s'étend pas jusqu'à la côte. Elle n'est sensible que jusque vers 800 mètres. Leur vitesse reste inférieure à 2-3 m/s.

3.4.4 Vitesses moyennes des vents non cycloniques

Le tableau 3.5, présente, mois par mois, les vitesses moyennes mensuelles à 2 mètres au-dessus du sol exprimées en km/j (vent passé) pour les 8 stations automatisées IRAT (A.3) (EN ERCO 295-11).

On voit que sur le littoral, la vitesse journalière est la plus élevée de juillet à octobre (période des alizés soutenus) ; elle est la plus faible en mars-avril. A l'intérieur (Petite France, Trois Bassins, Bebour), l'amplitude d'un mois à l'autre est faible. Janvier et février paraissent les mois les plus ventés. Bebour, station la plus centrale, semble bien protégée car c'est la moins ventée.

TAB. 3.5 – *Vents moyens (km/j) pour 8 stations de l'île*

STATIONS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
SAINT BENOIT	160	143	125	132	119	110	145	177	198	202	141	145	149
PIERREFONDS	185	187	161	176	179	187	197	201	188	205	182	I65	184
LIGNE PARADIS	176	l95	176	164	185	194	206	212	212	222	189	166	192
TERRE ROUGE	205	192	154	162	164	168	165	196	198	227	227	193	185
PITON SAINT LEU	165	159	128	132	150	164	155	146	152	144	145	139	149
TROIS BASSINS	189	177	156	157	173	188	191	184	181	172	170	167	170
BEBOUR	63	111	95	64	64	63	60	81	66	73	52	45	69
PETITE FRANCE	200	200	150	160	165	170	172	175	165	160	155	160	169

3.5 L'ensoleillement

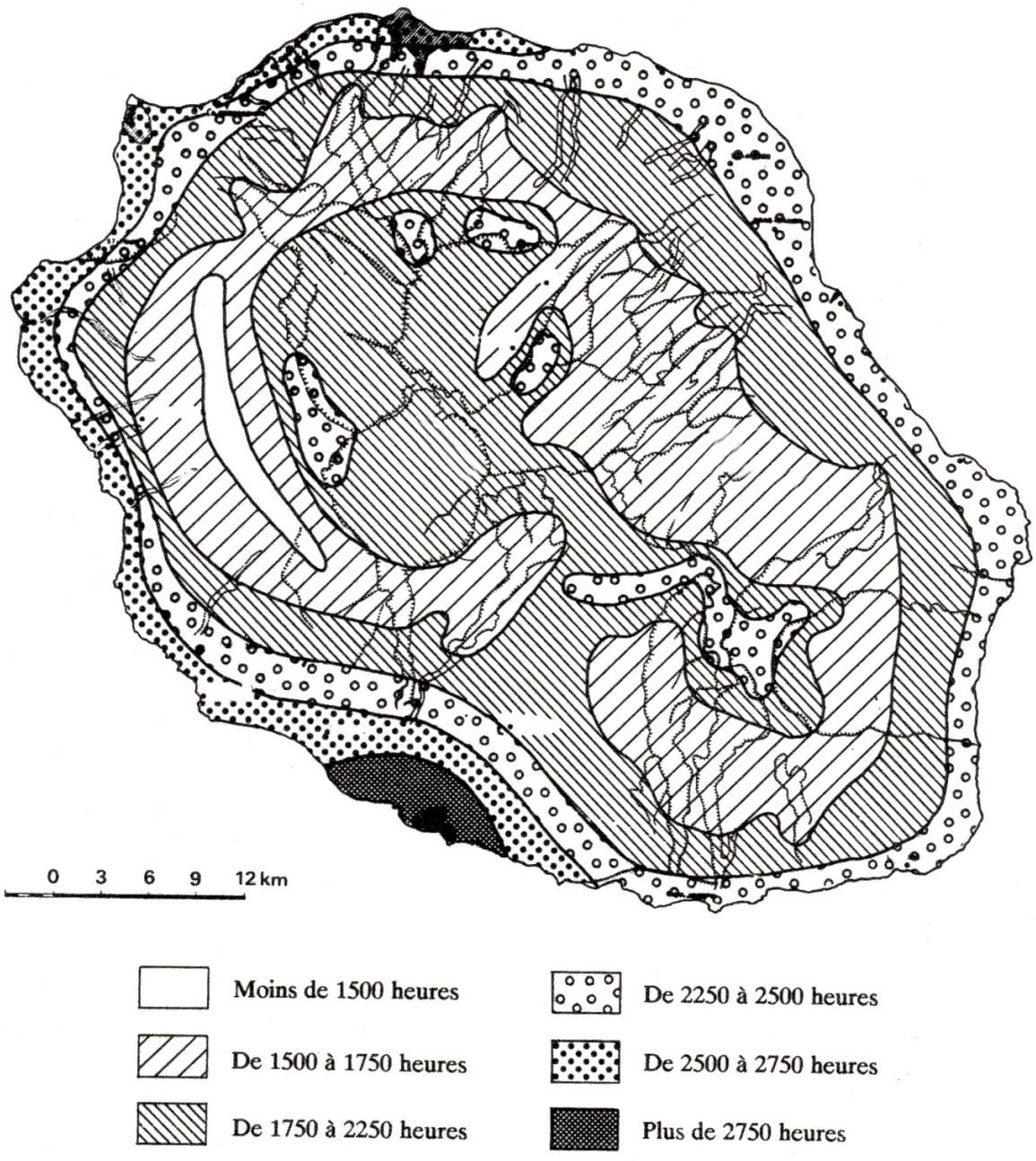
3.5.1 L'ensoleillement annuel

Environ 35 stations de l'île sont équipées d'héliographes CAMPBELL.

Les valeurs de l'ensoleillement annuel sont liées surtout à l'altitude et à l'exposition. Du littoral vers les sommets, l'ensoleillement décroît jusque vers 1 400-1 600 mètres (correspondant au maximum pluviométrique) ; puis il augmente à nouveau, au fur et à mesure que les sommets émergent de la «mer de nuages» (photo A.7). Au-dessus de 1 800 mètres, on retrouve des valeurs comparables à celles du littoral. Le littoral «au vent» est moins ensoleillé que le littoral «sous le vent».

Des effets de foehn et de subsidence dégagent relativement l'ensellement «Plaine des Cafres/Tampon». A l'opposé, des effets de convection libre marquée augmentent la couverture nuageuse ; c'est le cas dans l'ouest vers 1 500 mètres, entre Petite France et la Plaine des Makes, bande la moins ensoleillée de l'île (moins de 1 500 heures).

FIG. 3.12 – *Essai de cartographie de la distribution de l'ensoleillement moyen annuel à la Réunion*



(.jpg)

La figure 3.12 est un essai de cartographie de l'ensoleillement moyen annuel. On y voit que sur les pentes externes, la partie la plus ensoleillée est la région de Saint Pierre/Ligne Paradis, avec 2 750 à 3 000 heures par an. En deuxième lieu vient une étroite bande littorale entre Gillot et Petite Ile (2 500 à 2 750 heures). Le littoral sud, est et nord-est a des valeurs comprises entre 2 250 et 2 500 heures. Dans l'ouest, cette bande est comprise entre 100 et 300/400 mètres d'altitude. Ensuite, jusque vers 500/600 mètres, les valeurs baissent jusqu'à environ 1 750 heures. L'étage le moins ensoleillé est compris entre 600 et 1 500/1 700 mètres (excepté dans La Plaine des Cafres et dans les Cirques). Au-dessus, on retrouve un ensoleillement croissant pour atteindre 2 500 heures à partir de 2 500 mètres d'altitude.

BARGEAS (1.984) a mis en évidence une bonne relation linéaire entre ensoleillement mensuel et altitude jusqu'à 1 000 mètres avec une décroissance moyenne de 140 heures pour 100 mètres

3.5.2 Les variations saisonnières

Il y a généralement 2 maxima - l'un en janvier, l'autre en août - et deux minima - un «grand» minimum (février, mars, avril) et un «petit» minimum (novembre). Dans l'est, les amplitudes sont moins marquées. Ainsi à la Plaine des Palmistes, l'ensoleillement mensuel est autour de 140 heures.

Les stations d'altitude (Bellecombe, Plaine des Cafres...) semblent présenter un grand maximum en octobre.

Le minimum d'ensoleillement moyen mensuel est observé en novembre à Petite France (97,4 heures). Le maximum est enregistré en janvier à Saint Pierre (276 heures).

3.6 Le rayonnement

Le rayonnement est un paramètre important dans le calcul de l'ETP-Penman.

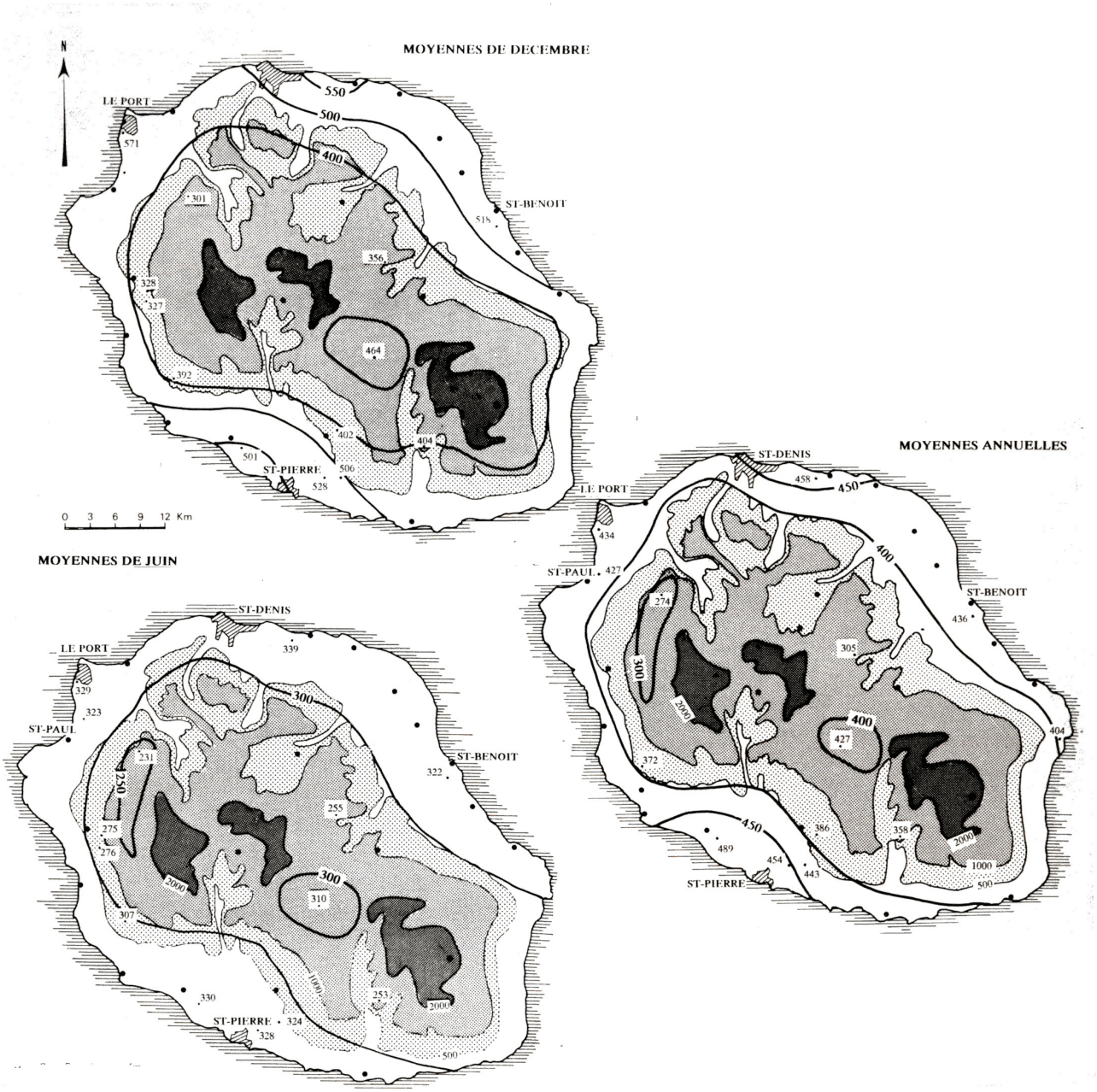
Le rayonnement solaire global (RG) est le rayonnement incident de courte longueur d'onde reçu par une surface horizontale (en cal/cm^2). Il est mesuré directement au pyranomètre par Météo-France à Gillot (depuis 1.973), au Port et à la Plaine des Cafres (depuis 1.982). Il existe un poste à Bébour géré par EDF (depuis 1.985).

Enfin l'IRAT (A.3) a installé depuis 1.983, 11 stations automatiques (ENERCO 295-11, fabriqué par CIMEL) mesurant le rayonnement global : Savannah, Saint Benoît, Pierrefonds, Ligne Paradis, Terre Rouge, Piton Saint Leu, Le Tampon, Colimaçons, Trois-Bassins, Grand Coude, Petite France. MétéoFrance est en train d'installer 15 nouvelles stations automatiques, ce qui permettra bientôt de compléter les données (spécialement dans les cirques).

A partir de ces données, B. GENERE (IRAT (A.3), 1.989) a pu faire une esquisse cartographique (Fig. 3.13) du rayonnement global : valeurs annuelles, valeurs maximales (décembre), valeurs minimales (juin).

Le rayonnement global varie en fonction de la durée du jour et de l'ensoleillement. C'est en décembre que l'ensoleillement est maximum et en juin qu'il est minimum.

FIG. 3.13 – *Essai de zonage du rayonnement solaire global à la Réunion (cal/cm^2 /jour d'après B. GENERE et R. NATIVEL -1.989)*



(.jpg)

Deux régions présentent les valeurs les plus élevées : ce sont les zones littorales de Saint Pierre/Pierrefonds et de Saint Denis/Gillot, avec 450cal/cm^2/jour en moyenne pendant l'année. Plus le RG moyen annuel est élevé, plus le contraste saisonnier est marqué.

Le réseau de mesures est encore insuffisant pour apprécier l'influence du relief sur le rayonnement. Les diverses composantes orographiques (encaissements, pentes, expositions) jouent certainement un grand rôle sur les valeurs locales. D'autre part, on ne connait pas les valeurs et les variations du rayonnement global au-dessus de 1 600 mètres d'altitude.

On peut supposer que sur les pentes externes, la zonation régionale des moyennes annuelles suit à peu près celle de l'ensoleillement (fig. 3.12), c'est-à-dire que : à partir du littoral où il est maximum, le RG diminuerait jusque vers 1 500/1 700 mètres (correspondant au maximum pluviométrique), puis il augmenterait à nouveau jusqu'aux plus hautes altitudes émergeant de la mer de nuages.

3.6.1 Le rayonnement net (RN)

C'est le rayonnement qui pénètre réellement dans le sol (exprimé en cal/cm^2), et qui est donc une composante importante contribuant à l'ETP (dont tient compte l'estimation de PENMAN). Il résulte de 2 bilans :

- le bilan radiatif de courte longueur d'onde qui est la radiation solaire absorbée par le sol, égale à RG (1 - a), a étant l'albedo du sol.
- le bilan radiatif de grande longueur d'onde qui est la chaleur rayonnée par le sol, elle-même égale à la différence entre le rayonnement terrestre (Rt) et le rayonnement atmosphérique reçu par le sol (Ra). Celui-ci est régit essentiellement par la vapeur d'eau exprimée en fonction de la pression de vapeur d'eau.

Donc :

$$RN = RG(1 - a) - Rt - Ra$$

Le rayonnement net peut être mesuré directement grâce à un pyrradiomètre différentiel (ou bilan-mètre) et le rayonnement atmosphérique Ra, au pyrgéomètre Eppley. Ils sont délicats à utiliser et il n'en n'existe pas d'exemplaires à la Réunion (en 1.990).

Sinon, le rayonnement net est estimé empiriquement. C'est le rayonnement atmosphérique Ra qui est le plus difficile à évaluer.

3.6.2 Le rayonnement global RG

Il est maintenant mesuré sur une quinzaine de stations. Sinon il peut être évalué par la formule de PRESCOTT (1.940)

$$RG = Iga(a + \frac{bn}{N})$$

avec :

- Iga = rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère (ou rayonnement extra terrestre)
- Il dépend de la latitude et des saisons et est donné par les tables d'ANGOT en cal/cm^2/jour (tab. 3.6)

$$\frac{\text{n ensoleillement réel (heures), mesuré}}{\text{N ensoleillement maximum possible, donné par des tables}}$$

* a et b = coefficients empiriques, dits coefficients d'ANGSTROM (0,12 à 0,60 en fonction de l'altitude et de la saison à la Réunion).

3.6.3 Le rayonnement terrestre Rt

Il est proche de σTa4 avec :

- σ = constante de Stephan-Boltzman =1,18.10-7 cal/cm^2/jour/$^\circ$ K
- Ta = température de l'air sous abri en degrés Kelvin.

Rt est donc aisé à estimer.

3.6.4 Le rayonnement atmosphérique Ra

Il est exprimé par BRUNT (1.934), en fonction de la pression de la vapeur d'eau

$$Ra = \sigma Ta4(a + b\sqrt{e})$$

avec :

- e = pression de la vapeur d'eau réelle mesurée sous abri, en mm de mercure
- a et b = coefficients empiriques

donc :

$$Rt - Ra = \sigma Ta4\ (1 - a - b\sqrt{e})$$

PENMAN a introduit un terme correctif multiplicatif pour tenir compte des nuages. Ce terme est une fonction linéaire de la fraction d'ensoleillement n/N.

Il est égal à :

$$c + d\frac{n}{N}$$

Donc la formule de BRUNT devient :

$$Rt - Ra = \sigma Ta4(1 - a - b\sqrt{e})(c + d\frac{n}{N})$$

Par conséquent, le rayonnement net est :

$$RN = RG(1 - a) - \sigma Ta4\ (1 - a - b\sqrt{e})(c + d\frac{n}{N})$$

Ce rayonnement estimé dépend donc des valeurs attribuées à l'albedo (a) aux coefficients a et b de la formule de BRUNT et aux coefficients c et d du facteur correctif de PENMAN.

Nous verrons que du choix de ces coefficients, dépendent les valeurs de l'ETP-PENMAN.

3.7 L'humidité relative

Les masses d'air très humide portées par les alizés entretiennent une humidité relative élevée. La moyenne annuelle est toujours supérieure à 75%, excepté sur la zone littorale occidentale de Gillot à Petite Ile. Les moyennes des minima mensuels sont les plus faibles de juillet à octobre. Les moyennes des maxima mensuels présentent moins de variations durant l'année. Elles sont partout supérieures à 86 % de décembre à mars et, dans les 2/3 de l'île, comprises entre 95 et 100 %. Les figures 3.14 et 3.15 sont une tentative de zonage des courbes d'isohumidité relative :

- pour les moyennes annuelles,
- pour les moyennes des minima du mois le plus «sec».

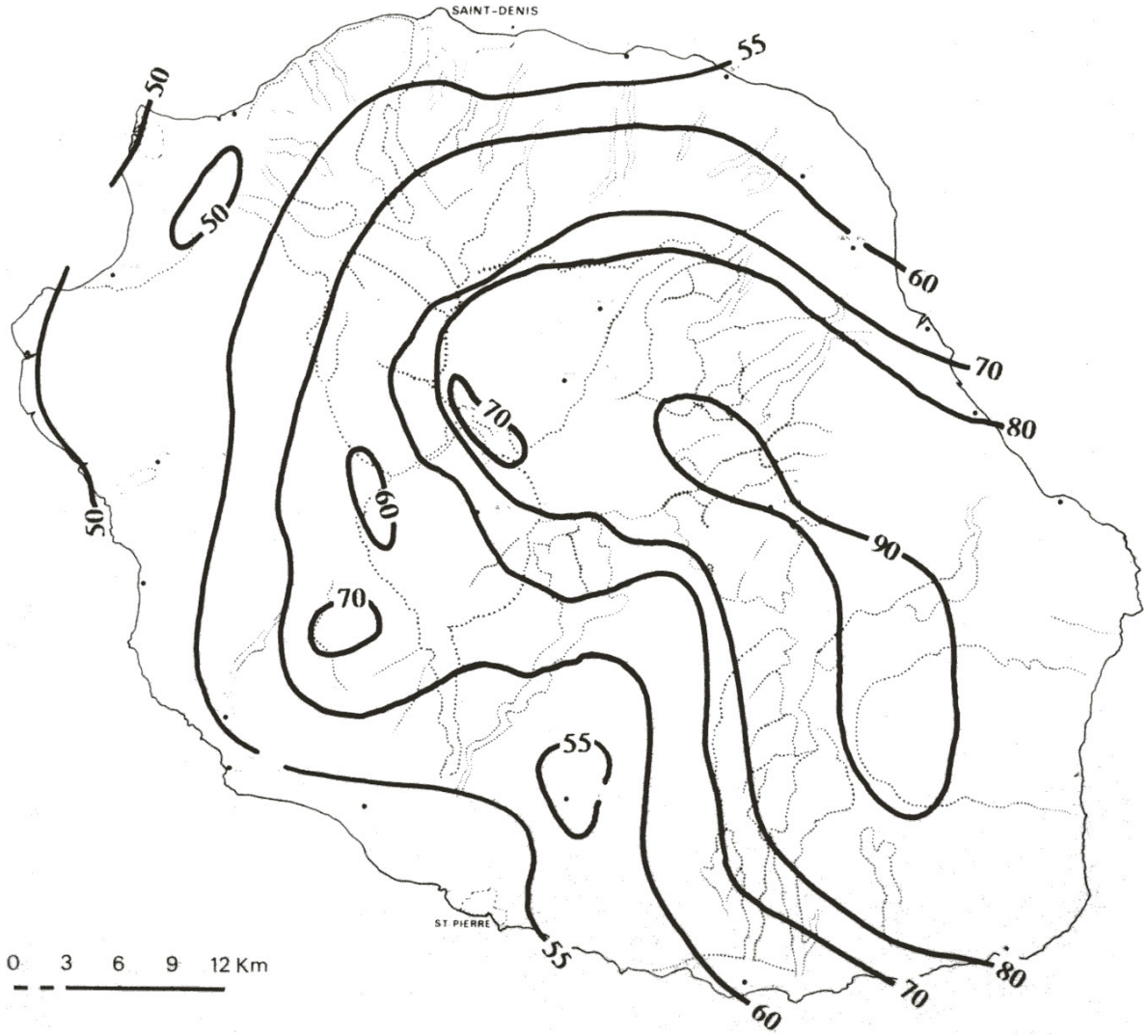
On s'aperçoit que dans l'ouest et le sud-ouest, les moyennes des minima sont relativement faibles (50 à 60 %) du fait d'une moindre exposition directe aux alizés et également grâce à l'effet de foehn desséchant. Ce foehn est particulièrement net dans la large gouttière Plaine des Cafres/Tampon, où les courbes forment des «rentrants», isolant un minimum au niveau du Tampon.

Au-dessus de la mer de nuages, c'est-à-dire, au-dessus de 2 500 mètres d'altitude (Grand Benard, Piton des Neiges), l'humidité moyenne est moindre et décroît légèrement par rapport au gradient inférieur.

FIG. 3.14 – *estimation des moyennes annuelles d'humidité relative (%)*

(.jpg)

FIG. 3.15 – *Estimation des moyennes des minima d'humidité relative (%) du mois le plus «sec» (août en général)*



(.jpg)

3.8 Evapotranspiration

Rappelons que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est une notion introduite par THORNTHWAITE en 1.948 : c'est l'évapotranspiration maxima d'un couvert végétal bien couvrant, abondamment pourvu en eau. C'est une grandeur physique de référence qui exprime la demande climatique en eau et qui est uniquement fonction des caractéristiques énergétiques et dynamiques de l'environnement atmosphérique. Cette hypothèse est valable pour des grandes surfaces et des intervalles de temps assez longs. A la suite de PENMAN, on préfère se référer comme couvert végétal, à un gazon court.

- De nombreuses mesures en cases lysimétriques ont montré que l'évapotranspiration maxima (ETM) d'une culture n'est pas toujours l'ETP, mais qu'elle est conditionnée par la surface évaporante de cette culture. Elle dépend du stade végétatif de la plante, de son état de couverture et des propriétés hydropédologiques du sol. Le rapport K = ETM/ETP est compris entre 0 et 1. Il est appelé «coefficient cultural». Exceptionnellement K peut être supérieur à 1.
- Enfin l'évapotranspiration réelle (ETR) est celle de restrictions en eau, ce qui n'était pas le cas pour l'ETP et l'ETM. La plante régule sa consommation en eau par fermeture de ses stomates ; donc ETR s ETM.

3.8.1 Détermination de l'ETP

- L'ETP peut se mesurer directement in situ par un dispositif lysimétrique pesable recouvert d'un gazon court. Cette mesure est délicate. Un tel dispositif se justifie lorsqu'on veut «ajuster» et adapter localement les estimations d'ETP par des formules utilisant des considérations physiques théoriques, acquises plus ou moins empiriquement. La mesure par lysimétrie constitue alors la référence. Pour l'instant un tel dispositif n'existe pas à la Réunion.
- Les formules d'ETP, à données empiriques, sont nombreuses.
  Les plus proches de la réalité sont généralement :
  - l'ETP-TURC (ayant la préférence des hydrologues),
  - l'ETP-PENMAN (ayant la préférence des agronomes),
  - l'évaporation d'eau libre dans un BAC «CLASSE A» (prisée par les agronomes car facile à mesurer quand l'ETP-Penman n'est pas possible).

C'est la formule de TURC qui a été la plus couramment utilisée à la Réunion par Météo-France, (14 stations depuis 1.971).

Depuis 1.983, on utilise aussi la formule de PENMAN, en particulier grâce à 15 stations automatiques (dont 11 IRAT (A.3)) mesurant le rayonnement solaire global de façon directe au pyranomètre (autrefois, sauf à Gillot, RG était estimé par la formule de GLOVER et MAC CULLOCH établie au Kenya). Météo-France installe actuellement 15 autres stations automatiques.

3.8.2 l'ETP - TURC

Pour des humidités relatives supérieures à 50 %, la formule de TURC est la suivante :

$$ETP = 0{,}013\, n \frac{T}{T+15}(RG + 50)$$

(en mm/n jours)

- n est le nombre de jours de l'intervalle de temps considéré (de 5 jours à 1 mois)

- T est la température moyenne mesurée sous abri pendant la période considérée
- RG est le rayonnement solaire global en cal/cm^2/j.

Jusqu'à 1.982, RG n'était pas mesuré à la Réunion (excepté à Gillot à partir de 1.973). BARGEAS (1.984) a alors adapté pour la Réunion, la formule de TURC, de la façon suivante :

$$ETP = mIga(0{,}18\ + 0{,}62\frac{n}{N})\frac{T}{T+15}$$

(en mm/mois)

où

- m = coefficient mensuel (m = 0,4 pour tous les mois, sauf février et m = 0,37 pour février)
- Iga : radiation maximale théorique (cal/cm^2/j)
- n = durée d'ensoleillement réelle (en heures)
- N = durée astronomique du jour (en heures)

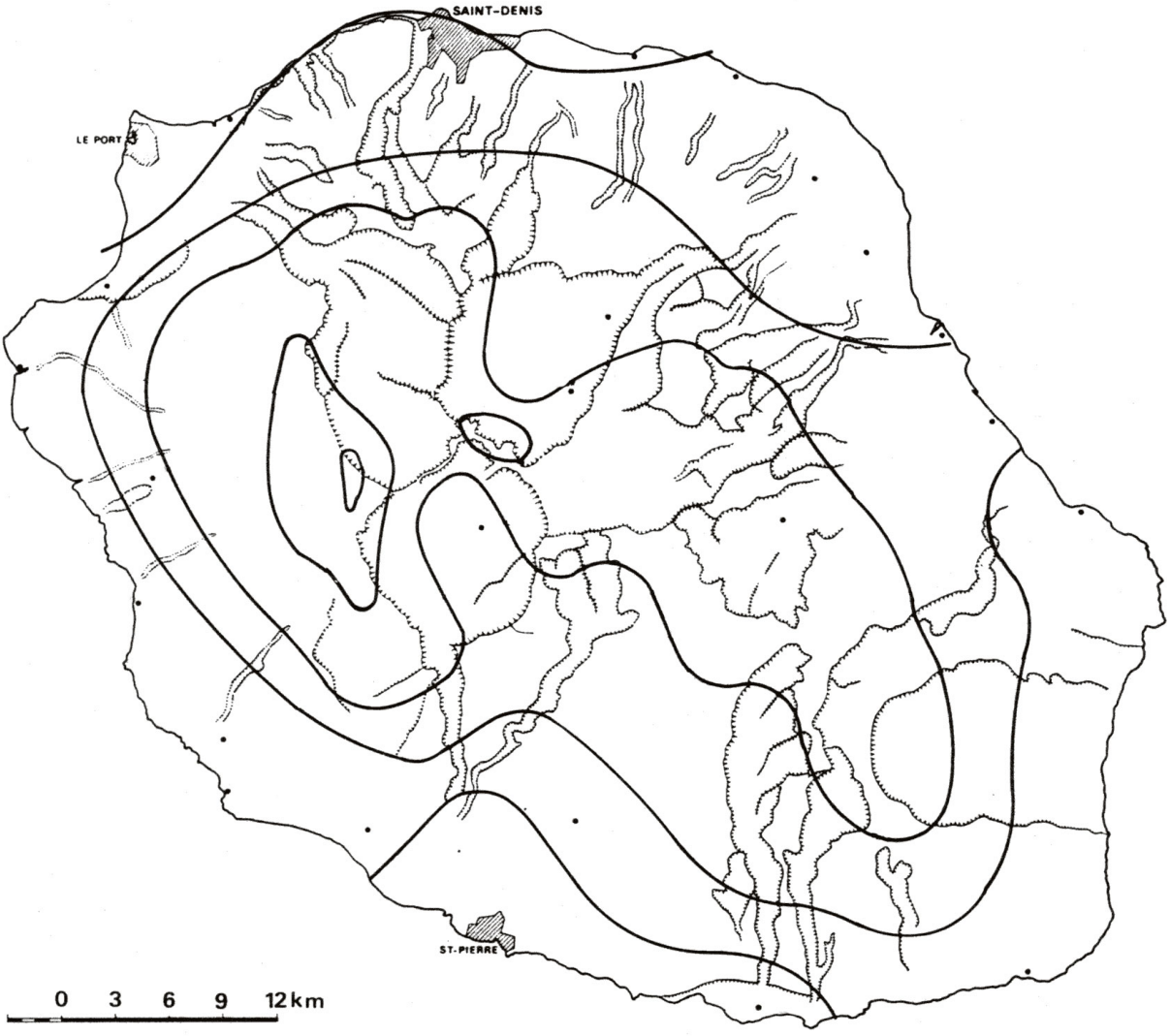
Iga et N sont données par les tables d'ANGOT, pour la latitude de la Réunion (21 ° latitude sud) :

TAB. 3.6 – *Radiations maximales théoriques (cal/cm^2/j) et durée astronomique du jour (h) à la Réunion.*

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Iga	988,3	935.6	838,8	716,3	603,9	557,8	584,6	6805	800,6	902	972,6	995,6
N	412,3	360,8	378,6	348,0	344.8	325,3	340,8	354,2	359,5	389,4	393,8	414,7

L'ETP-TURC mensuelle ne dépend donc que de la température et de l'ensoleillement moyens mensuels, données disponibles régulièrement. En utilisant les résultats d'une ACP, BARGEAS (1.984) a réalisé un zonage de l'ETP-TURC en calculant cette valeur (moyenne annuelle) maille par maille (de 3 km de côté sur toute l'île). L'incertitude sur l'ETP est alors de 10 à 20%. Le résultat est donné par la figure 3.16.

FIG. 3.16 – *Distribution spatiale de l'ETP- TURC. Moyenne annuelle (mm)1.971-1.981(d'après Bargeas-1.984)*

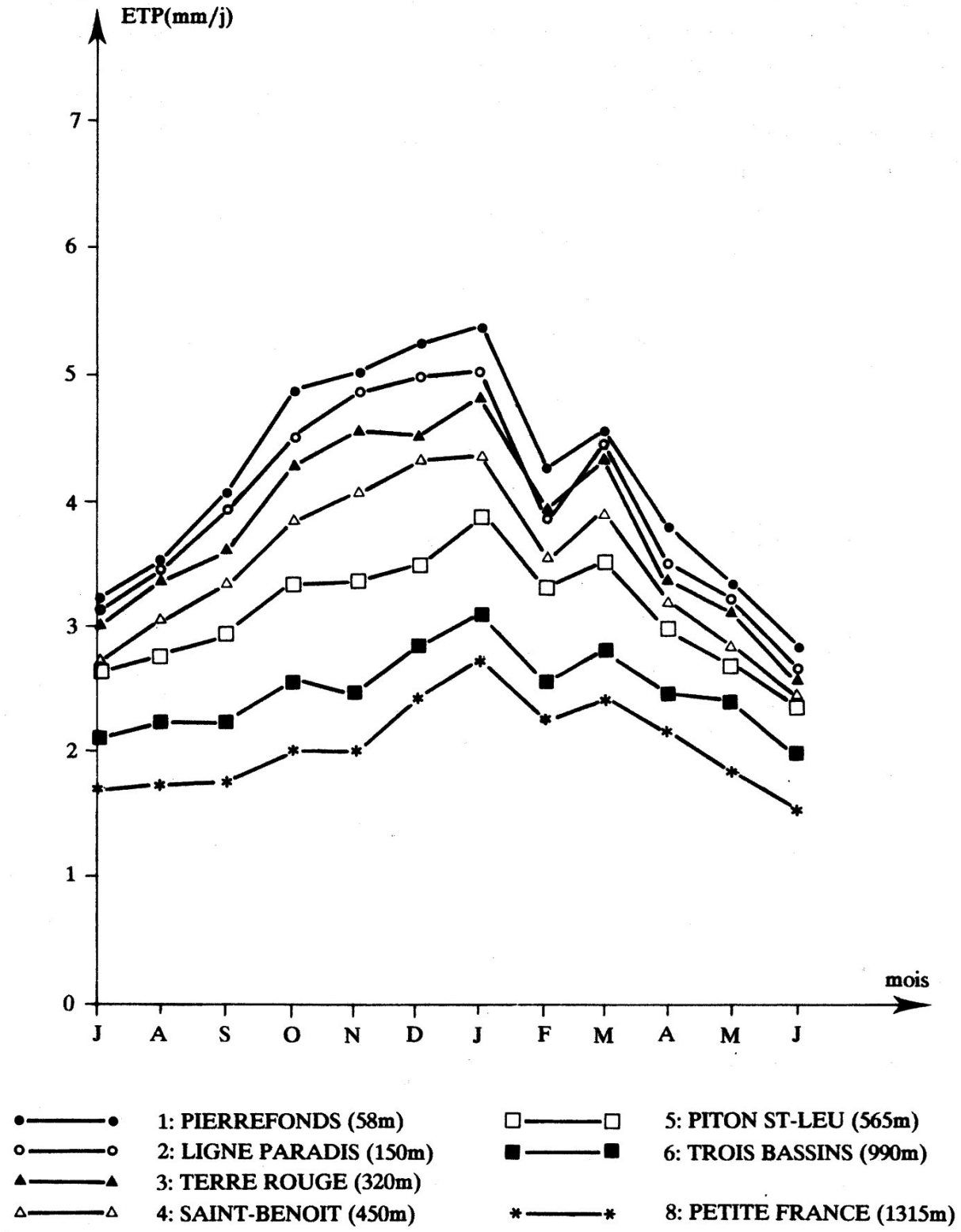


(.jpg)

On voit que l'ETP est commandée fortement par la température donc l'altitude. Ce sont les zones littorales, du Port à Sainte Marie et de Pierrefonds à Saint Joseph, qui présentent les valeurs annuelles les plus élevées (1 400 à 1 500 mm par an). Les zones de très haute altitude (Piton des Neiges, Grand Bénard) auraient une ETP-TURC inférieure à 800 mm par an.

La figure 3.17 indique les variations annuelles des ETP mensuelles sur les stations automatisées IRAT (A.3) (donc utilisant cette fois des valeurs mesurées de RG), d'altitudes différentes. Partout les valeurs maxima s'étalent de novembre à janvier. Un maximum secondaire s'observe en mars. Le minimum est partout en juin-juillet. Les amplitudes annuelles sont d'autant plus faibles que l'altitude augmente.

FIG. 3.17 – *Variations mensuelles des moyennes d'ETP - TURC (1.984-1.986) en mm/j*



(.jpg)

3.8.3 ETP-PENMAN

L'ETP-PENMAN tient compte du bilan énergétique au niveau du sol et des phénomènes de diffusion turbulente au-dessus. L'énergie disponible au niveau des surfaces évaporantes a en effet deux sources : le rayonnement net (RN) et l'advection, c'est-à-dire le pouvoir évaporant de l'air (Ea)

$$ETP - PENMAN = f(RN) + f(Ea)$$

Le terme advectif f(Ea) ne contribue que pour 10 à 20 % à l'ETP.

Nous avons vu que la formule de BRUNT (corrigée par PENMAN) donnait :

$$RN = RG(1 - a) - \sigma Ta4\ (1 - a - b\sqrt{e})(c + d\frac{n}{N})$$

avec :

- RG = rayonnement global (cal/cm^2)
- a = albédo d'un gazon
- σ = constante de Stephan-Boltzman
- Ta = température de l'air sous abri (degrés KELVIN)
- e = tension réelle de la vapeur d'eau sous abri (mm)
- n = ensoleillement réel (heures)
- N = ensoleillement maximum possible (heures).

PENMAN définit le pouvoir évaporant de l'air (Ea) comme le produit du déficit de saturation de l'air par une fonction du vent (u) :

$$Ea = 0{,}26\ (ew - e)(1 + 0{,}54\ U2)$$

avec :

- ew - e = déficit de saturation de l'air
- ew = tension maxima de la vapeur d'eau saturante à la température de l'air (tables)
- e = tension réelle de la vapeur d'eau à la température de l'air mesurée sous abri. Elle dépend de ew et de l'humidité relative HR :

$$e = \frac{HR.ew}{100}$$

- U2 = vent passé en km/j à 2 mètres au-dessus du sol.

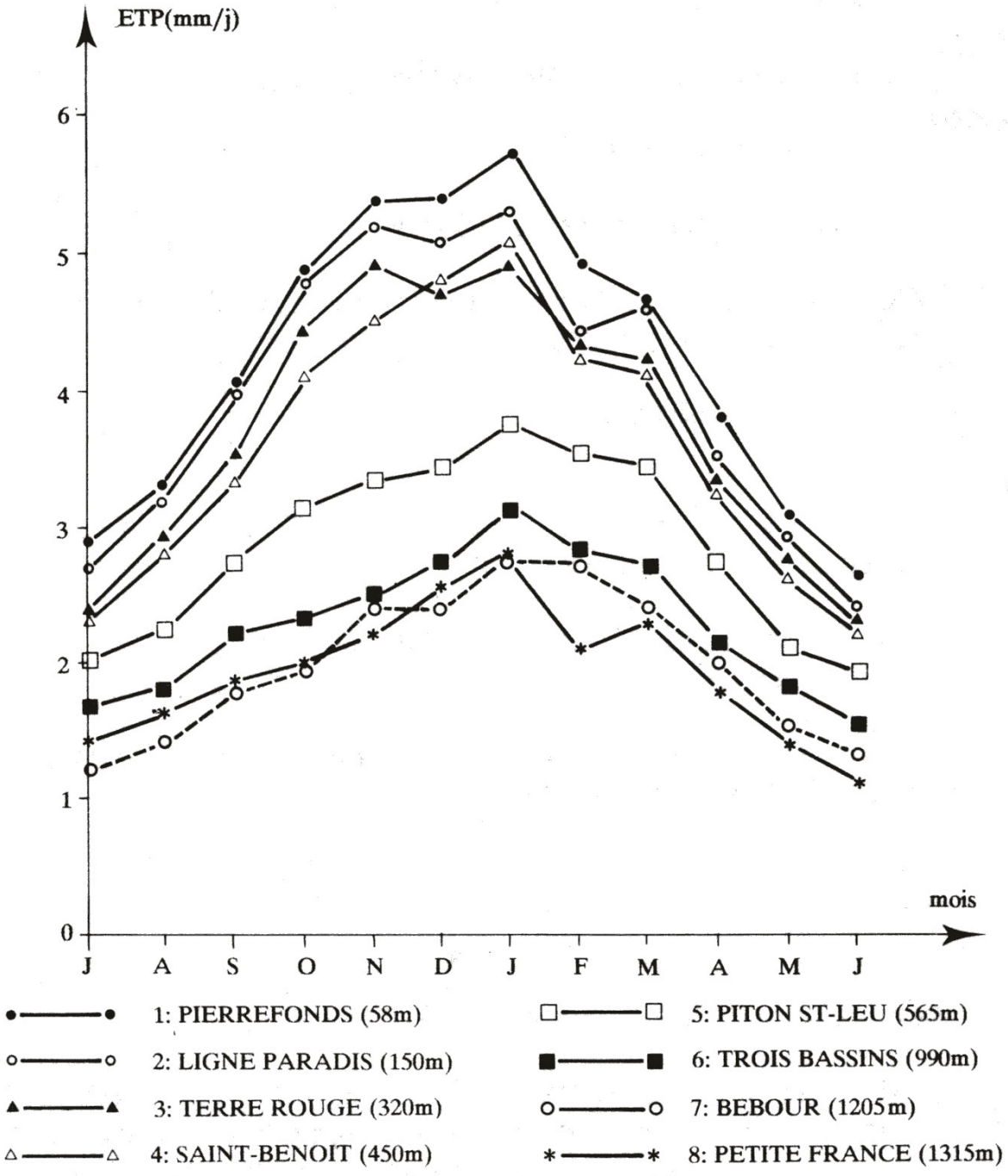
Le calcul de la formule de PENMAN nécessite donc les mesures des composantes suivantes : rayonnement global, température, humidité relative et vent. Les calculs (fastidieux) sont facilités par des tables et abaques.

Les valeurs calculées dépendent de l'albédo et des coefficients adoptés dans le terme radiatif, à savoir : (1- a), b, c, d.

- l'albédo moyen d'un gazon pour la Réunion a été pris égal à 0,20
- Dans la formule de BRUNT, ont été adoptés les coefficients suivants :
  - (1-a)=0,56

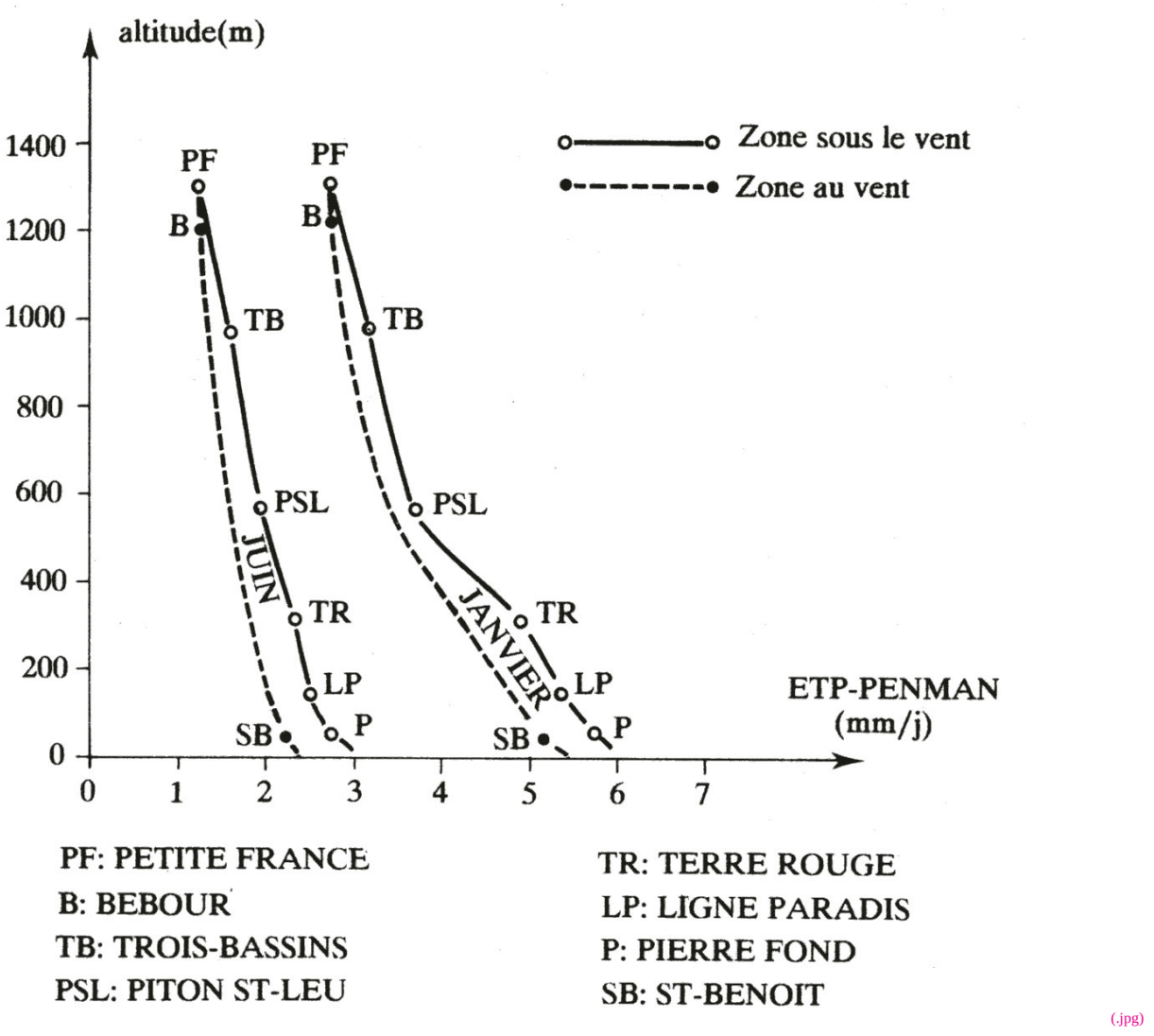
  - b = 0,08
  - c = 0,3
  - d = 0,7
- Résultats : La figure 3.18 montre les valeurs moyennes mensuelles pour les 8 stations de l'île équipées de capteurs automatiques (ENERCO 295-11). Partout l'ETP est maxima en janvier et minima en juillet. Un petit maximum relatif s'observe en mars, comme on l'avait constaté pour l'ETP-TURC.

FIG. 3.18 – *Variations mensuelles des moyennes d'ETP- PENMAN (1.984 -1.986) en mm/j (d'après Généré -1.987)*



(.jpg)

FIG. 3.19 – *Variations de lETP-PENMAN en janvier (max.) et en juin (min.) en fonction de l'altitude*



(.jpg)

C'est toujours la zone Pierrefonds/Saint Pierre/Ligne Paradis qui présente une ETP maxima, avec une moyenne annuelle de 4 à 4,2 mm/jour (5,8 à 6,7 mm en janvier, 2,4 à 2,6 mm en juillet). Les stations de l'intérieur et des hauts de l'île présentent les ETP les plus faibles avec une moyenne annuelle de 1,8 à 2,2 mm/jour (2,8 à 3 mm janvier, 1 à 1,5 en juillet).

L'amplitude des variations est très marquée sur le littoral et peu marquée dans les hauts.

Si on compare les valeurs annuelles de l'est et de l'ouest (Fig. 3.19), il semble que l'ETP du littoral est ne se retrouve qu'à 250 mètres dans l'ouest. De même 1 200 mètres dans l'est, serait l'équivalent de 1 300 mètres dans l'ouest. A altitudes égales, les différences d'ETP entre les deux façades, au vent et sous le vent, tendent à diminuer au fur et à mesure qu'on monte en altitude. On peut supposer qu'à partir de 1 600 mètres, l'ETP est minima partout (1,4 à 1,7 mm ?) sauf peut être dans l'ensellement de la Plaine des Cafres, où cette ETP serait supérieure (2,2 à 2,5 mm ?) à ce qu'on trouve ailleurs à la même altitude sur les versants externes.

3.8.4 L'évaporation en bac - classe a

Le bac «classe A» est un bac normalisé dans ses dimensions et hauteur au-dessus du sol. Il est rempli d'eau libre (protégée par un grillage) dont on mesure quotidiennement à l'aide d'une jauge, la diminution de hauteur, traduisant l'évaporation. Cette évaporation est le résultat de l'effet intégré du rayonnement, du vent, de la température et de l'humidité relative de l'air. On suppose qu'il n'y a pas de transfert d'énergie à travers les parois du bac.

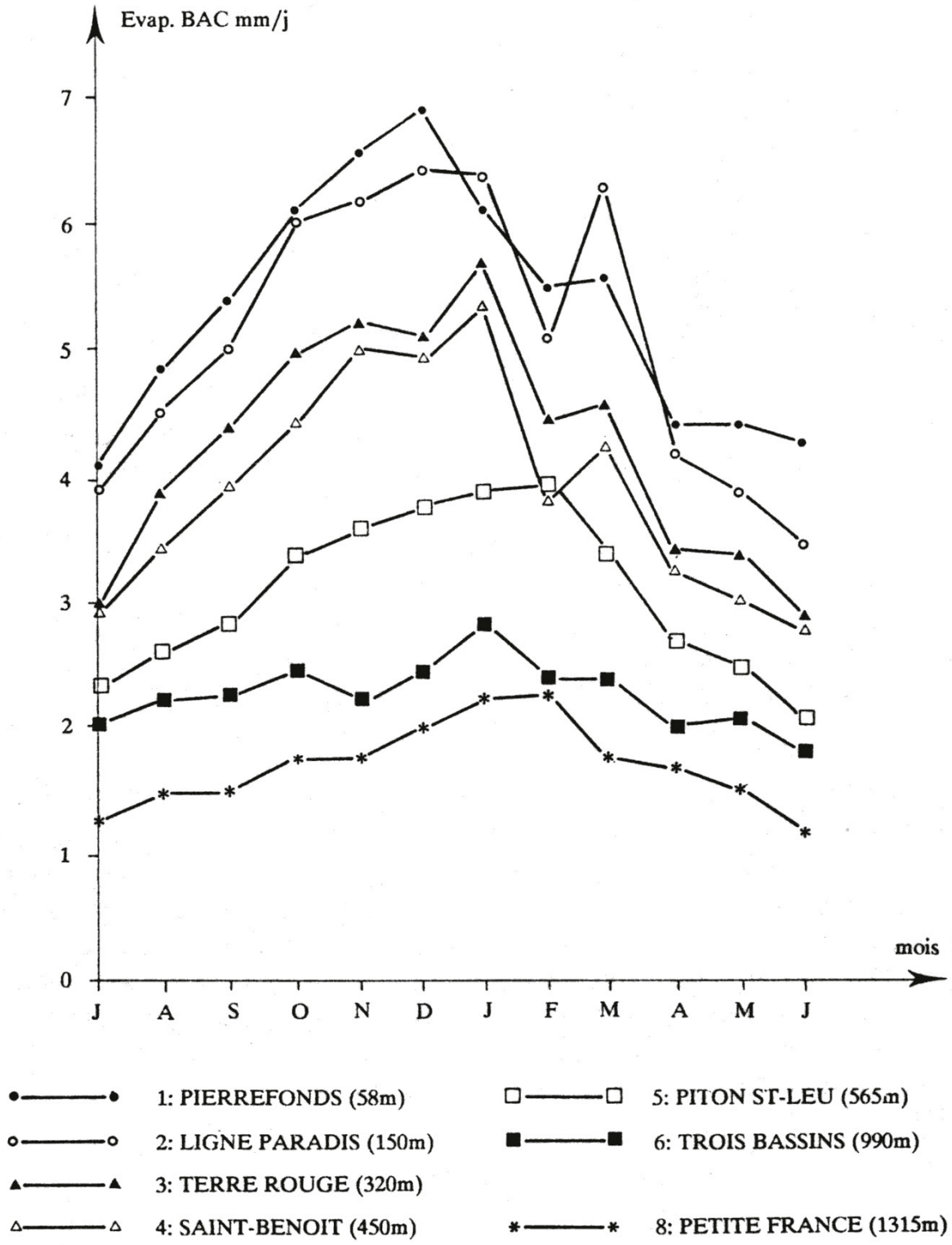
L'intérêt de la mesure de l'évaporation d'eau libre est qu'on peut la relier à l'ETM des plantes cultivées grâce à des coefficients K variables suivant la saison, le stade végétatif, la couverture du sol et bien sûr la nature de la culture :

$$ETM = KEv.bac$$

On peut ainsi estimer assez correctement la demande évaporative d'une culture à un stade donné. Les recommandations pour l'irrigation de la canne dans la région de Saint Pierre (SAPHIR (A.3), CERF (A.3), IRAT (A.3)) sont basées depuis 1.980 sur l'évaporation du bac classe A.

La figure 3.20 indique les variations mensuelles.

FIG. 3.20 – *Variations mensuelles des moyennes d'évaporation Bac- classe A (1.980 - 1.986) en mm/j*



(.jpg)

3.8.5 Comparaison des trois méthodes

Si on compare les résultats des stations automatiques (Fig. 3.17, 3.18 et 3.20), on constate que :

- les allures des courbes, indiquant le sens de variation des ETP, sont toujours les mêmes : le grand maximum est en janvier et le minimum est en juin. Un maximum secondaire s'observe partout en mars.
- l'ordre de classement des stations est le même quelle que soit la méthode utilisée. Les stations «sous le vent» sont bien classées en fonction de l'altitude. Concernant la comparaison est-ouest, l'ETP de Saint Benoît sur le littoral équivaut à l'ETP de 350/400 mètres d'altitude dans l'ouest.
- quelle que soit la méthode utilisée, plus la station est en altitude, plus l'amplitude interannuelle de l'ETP est faible (les courbes «s'aplatissent»).

Comparons par exemple les amplitudes annuelles de Pierrefonds, Piton Saint Leu et Petite France :

	PENMAN	BAC	TURC
Pierrefonds (58 mm)	3 mm	2,8 mm	2,5 mm
Piton St Leu (565 m)	1,7 mm	1,7 mm	1,5 mm
Petite France (1315 m)	1,5 mm	1,2 mm	1,2 mm

L'amplitude annuelle est 2 fois plus faible à Petite France qu'à Pierrefonds. Vers 600 mètres d'altitude, l'amplitude est à peu près la même pour les trois méthodes. C'est à cette altitude que les trois courbes se superposent le mieux.

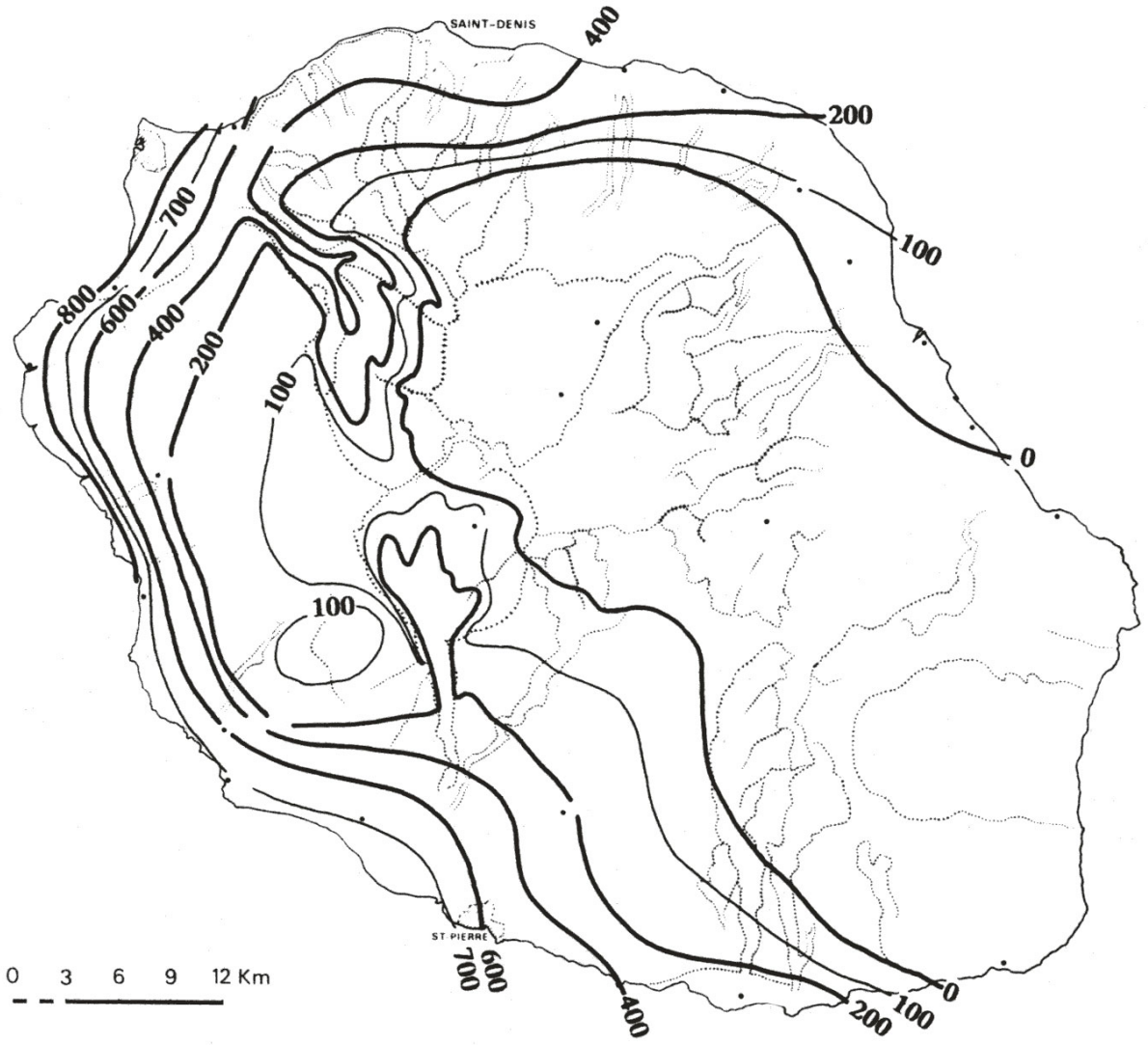
- Comparaison PENMAN-TURC : dans l'ouest, en saison chaude (octobre à mars) et entre 0 et 600 mètres d'altitude, l'ETP-TURC est inférieure à l'ETPPENMAN de 4 à 6 %. En saison fraîche (avril à septembre), c'est l'inverse, TURC est supérieur de 2 à 8 %. Au-dessus de 600 mètres d'altitude, à peu près toute l'année (mais surtout de mars à septembre), l'ETP-TURC est supérieure à l'ETP-PENMAN de 10 à 20 %.
- Comparaison PENMAN - BAC : entre 0 et 600 mètres d'altitude, l'évaporation BAC est toujours supérieure à l'ETP-PENMAN, cet écart diminuant avec l'altitude (10 à 30 % à Pierrefonds, 5 à 10 % à Piton Saint Leu). Au-dessus de 600 mètres en saison chaude, le BAC sous-estime légèrement par rapport à PENMAN, alors qu'en saison fraîche c'est l'inverse.
- Comparaison TURC - BAC : l'altitude 600 mètres paraît toujours être un seuil d'inversion des différences. C'est à cette altitude que les courbes sont les plus proches toute l'année :
  - en dessous de 600 mètres, le BAC est toujours supérieur à TURC de 20 à 25 % sur le littoral, de 5 à 10 % vers 300 mètres, de moins de 5 % vers 600 mètres.
  - au-dessus de 600 mètres, la différence est inverse, les valeurs du BAC sont inférieures (jusqu'à 20 %) à celles de TURC.

3.8.6 En conclusion demande et déficit climatiques

On peut, à l'heure actuelle, assez bien cerner la demande climatique jusqu'à la limite altitudinale des zones irrigables de l'ouest et du sud-ouest. En retenant l'ETP-PENMAN, la demande est maxima, au niveau de la mer, d'octobre à février avec 5 à 5,8 mm/jour. Elle est minima de mai à août avec 2,7 à 3,5 mn/j. Le reste de l'année, elle est comprise entre 3,5 et 5 mm/j. A 600 mètres, les maxima sont de l'ordre de 3,4 à 3,7 mm, les minima de 1,8 à 2,1 mm.

La figure 3.19 donne une première approche des variations des ETPPENMAN maxima (janvier) et minima (juin) en fonction de l'altitude et suivant qu'on considère la côte «sous le vent» ou la côte «au vent». On voit que pour une même altitude, l'ETP est inférieure dans l'est par rapport à l'ouest. Au niveau de la mer (Pierrefonds

FIG. 3.21 – *Le déficit climatique annuel (mm)*



(.jpg)

et Saint Benoît), la différence est maxima, de l'ordre de 0,6 mm, en juin comme en janvier. Cette différence s'atténue progressivement avec l'altitude. A partir de 1 200 mètres, elle s'annule. Ainsi à Petite France en juin comme en janvier (1 305 mètres, sous le vent) et à Bébour (1 200 mètres, au vent), les valeurs sont très proches, de l'ordre de 1,2 mm en juin et 2,8 mm en janvier.

Une remarque générale s'impose concernant toutes ces estimations théoriques. En principe, le calcul de l'ETP et du rayonnement suppose une surface plane infinie sans transfert latéral de chaleur. Ces conditions sont rarement réunies à la Réunion qui possède un relief très accidenté d'une part, des brises de terre et de mer d'autres part. La part de ces particularités locales n'est pas quantifiée. Il existe une multitude de situations particulières des points de vue orographique et exposition, qui doivent chacune corriger l'ETP théorique dans un sens ou dans l'autre. Ceci devrait faire l'objet de travaux de recherche utilisant les modèles numériques de terrain (MNT) afin d'aborder la spatialisation micro-régionale.

La figure 3.21 (inspirée de GENERE, 1.989) est un essai de zonage régional du déficit climatique annuel, c'est-à-dire la somme des différences positives (en mm) entre ETP-PENMAN mensuelle et P mensuelle.

GENERE distingue ainsi 5 niveaux remarquables de déficit climatique DC annuel :

- DC supérieur à 800 mm : étroite bande littorale de La Possession à Saint-Leu. Le déficit climatique y est présent toute l'année avec plus de 100 mm/mois de septembre à décembre. L'irrigation est la seule façon d'y faire de l'agriculture, mais les sols y sont ingrats.
- $600 < DC < 800$ mm : plaines littorales de Saint Leu à Saint Pierre, englobant Saint Louis et Etang-Salé ; «Arrière-littoral» entre La Possession et Saint Leu. Le manque d'eau intéresse 8 à 11 mois de l'année. Ce déficit est faible de mars à juin, très prononcé de juillet à janvier. L'irrigation est donc obligatoire pratiquement toute l'année.
- $600 < DC < 400$ mm : cette bande intéresse toujours la moitié ouest de l'île, de Gillot à Grand-Bois en passant par les basses et moyennes altitudes de La Montagne, Bois de Nèfles, Saint Gilles-Les-Hauts, La Saline-Les-Hauts, Les Colimaçons, Piton Saint Leu, Les Avirons, La Rivière, Ravine des Cabris, Terre Rouge. Le déficit y est de 7 à 8 mois (juin à décembre). Les sols y ont généralement une bonne fertilité, mais elle ne peut être valorisée toute l'année qu'avec l'irrigation (légumes, canne, fruitiers...). Ainsi la canne à sucre sans irrigation donne 40 à 70 t/ha alors que le potentiel en irrigué y est de 110-130 t/ha.
- $200 < DC < 400$ mm : cette vaste zone part de Sainte Suzanne/Sainte Marie, intéresse les pentes moyennes de l'ouest (1 000 mètres) et du sud-ouest (500 mètres), par Le Guillaume, Trois-Bassins, Ravine-Sèche, L'Entre-Deux, Le Tampon, Montvert-Les-Hauts, pour aboutir à Petite île/Langevin. Au nord et au sud , le déficit dure 4 mois (août à novembre au nord, septembre à décembre au sud). Ailleurs (dans l'ouest), le déficit dure 6 à 7 mois (mai à novembre/décembre). Le potentiel en canne irriguée est de 120/130 t/ha. Sans irrigation on dépasse rarement 90 t/ha.
- $0 < DC < 200$ mm : il s'agit des Hauts de l'Ouest (au-dessus de 1 000 mètres) et du sud-ouest (au-dessus de 500 mètres), des basses pentes du nord et du sud jusqu'à 200/500 mètres d'altitude. Cette zone englobe en particulier : Saint Benoît, Bras-Panon, Saint André, Dos d'Ane, Petite France, La Chaloupe-Saint-Leu, Le Tévelave, La Plaine des Cafres, Bérive, La Plaine des Grègues, Vincendo.

Ce zonage grossier est une première approximation moyenne. Il devrait être modulé en fonction, en particulier, de la capacité de rétention en eau des sols (épaisseur, % cailloux, granulométrie), en fonction des coefficients culturaux (K) de la culture considérée (espèce, stade du cycle, degré de couverture) et en tenant compte des précipitations occultes (rosées, crachins, brouillards). Le système de culture au niveau de l'exploitation et l'aménagement au niveau de la parcelle ont un effet sur le coefficient de ruissellement des eaux pluviales et interviennent donc également dans le bilan en eau. Enfin, comme déjà signalé, chaque grande zone renferme beaucoup de sites «atypiques» (couloirs de foehn desséchant, encaissements à convection privilégiée donc pluies supérieures, versants à l'ombre, contrastes d'albedo avec brises, etc.) où le déficit climatique peut être soit tempéré, soit renforcé.

Pour combler le déficit hydrique, les doses, fréquences et mode d'irrigation devraient prendre en compte tous ces paramètres.

Chapitre 4

LE CONTEXTE VÉGÉTAL

La phyto-écologie et la phyto-sociologie de l'île ont fait l'objet d'un remarquable travail de synthèse de T. CADET (1.980), suite à P. RIVALS (1.952) et dont nous reprendrons ici les grandes lignes.

Dans la continuité de ces deux auteurs de base, les contributions les plus significatives (jusqu'en 1.988), dans les domaines botanique, phytoécologique, forestier et de protection de la nature, proviennent : de la Société Réunionnaise pour l'Etude et la Protection de l'Environnement (SREPEN (A.3)) représentée par J. DUPONT et J.C. GIRARD, de l'ORSTOM (A.3) (J. BOSSER), du Museum (F. FRIEDMAN), de l'Université de la Réunion (J. FIGIER et R. LAVERGNE), de l'ONF, de l'UICN (A.3) - Alliance Mondiale pour la Nature (C. DOUMENGE et Y. RENARD).

La végétation naturelle de la Réunion est étagée suivant l'altitude et la pluviométrie (fig. 4.2).

T. CADET distingue ainsi 4 grands ensembles phyto- écologiques fondamentaux :

- la série mégatherme semi-xérophile,
- la série mégatherme hygrophile,
- la série mésotherme hygrophile,
- la végétation éricoïde oligotherme des hautes altitudes.

Naturellement, les séries mégathermes de moyennes et basses altitudes ont été en grande partie éliminées ou fortement dégradées par l'homme.

La flore de l'île est d'une grande richesse. On estime ainsi que, parmi la flore indigène :

- 90 % des espèces sont endémiques des îles du sud-ouest de l'océan Indien (Madagascar, Comores, Mascareignes),
- 60 % n'existent qu'aux Mascareignes (Maurice, Réunion, Rodrigues),
- 30 % sont endémiques strictes à la Réunion.

Après un historique rapide de l'emprise humaine, nous passerons en revue ces différents étages originels en indiquant leurs caractéristiques édaphiques, leur état de dégradation, leurs transformations par l'utilisation actuelle des terres ou leur envahissement par la végétation secondaire introduite.

Ensuite, nous complèterons l'exposé de la végétation de l'île par les thèmes suivants :

- la végétation littorale,
- la dynamique de colonisation des laves,
- la végétation secondaire et les «pestes» végétales,
- la sylviculture.

4.1 Historique rapide de l'impact de l'emprise humaine sur la végétation naturelle de l'île

L'île a cessé d'être totalement vierge dès la 2e moitié du XVIe siècle, avant même l'installation des premiers habitants en 1 646. C'est à partir de 1 545 que les navigateurs portugais auraient commencé à débarquer des animaux domestiques, en particulier des chèvres mais aussi des boeufs et des cochons, des chiens et des rats, qui, arrivés sur une île sans prédateurs, ont pu se multiplier et commencer leur action néfaste sur le milieu végétal, surtout sur l'éco-système littoral ouest. Les cabris sont sans doute à l'origine de l'aridification progressive de cette région.

De 1 646 à 1 665, s'installent dans la région de Saint-Paul, les premiers français, venus de Fort-Dauphin. Assez démunis et faiblement organisés, ils vivent sur eux-mêmes, de chasse, de cueillette et de cultures vivrières extensives. A l'époque existaient en abondance des animaux actuellement disparus : le solitaire (ou «dodo»), des tortues géantes de terre et de mer, des perroquets, huppes et autres oiseaux, des chauve-souris, de nombreux poissons d'eau douce. La plupart ont totalement disparus dès le milieu du XIX siècle.

1 665 marque le début du peuplement organisé de Bourbon à partir du Royaume, sous l'impulsion de la «Compagnie des Indes». Les «colons» débarquent et s'implantent dans la partie nord-ouest de l'île entre Saint-Paul et Sainte-Suzanne.

La période 1 665-1 713 constitue «l'époque des vivres». La mission des colons, auxquels la Compagnie attribuait des «concessions», était d'approvisionner les bateaux qui commerçaient sur la route des Indes. Ceux-ci étaient demandeurs de «grains» (maïs, blé, haricots, lentilles, arachide), de tabac et de rhum. Parallèlement, le rôle de l'île de France (Maurice) était surtout la fourniture de bois pour la réparation des bateaux. C'est de cette époque que datent les premiers déboisements systématiques en dessous de 300 m d'altitude entre Saint-Paul et Sainte-Suzanne. Au- dessus, la forêt commençait à se miter par les coupes destinées aux poutres des maisons, aux meubles, aux embarcations, au bois de feu, etc...

A partir de 1 720 et jusque vers 1 829, se situe la grande époque du café, par suite du monopole de la Compagnie des Indes pour l'importation de cette denrée dans le Royaume. Pendant cette période, la population augmente (forte immigration) et essaime dans toute la périphérie de l'île ; de cette époque date l'attribution des concessions en lanières étroites «du battant des lames au sommet des montagnes», qui pèse encore sur le régime foncier actuel (voir photo A.26). Mise à part la zone des laves récentes (Grand-Brûlé, Saint-Philippe), toutes les basses pentes de l'île jusqu'à 400m d'altitude (600 m dans l'ouest) ont été plantées en café après défrichement de la forêt naturelle. On assiste alors à une disparition presque générale (excepté dans la région de Saint-Philippe) des «bois de couleurs» des Bas. La région occidentale, entre Saint-Pierre et La Possession, avec un maximum au-dessus de Saint-Leu était la plus cultivée en café, malgré la longue saison sèche, la fragilité et la faible profondeur des sols, les pentes souvent fortes (20 à 40 %). Le faible enracinement des caféiers faisait que les cyclones occasionnaient des dégâts considérables aux plantations et surtout aux sols, l'ensemble étant régulièrement «balayé» vers la mer. Le café et les chèvres - auxquels s'ajoutaient les feux - ont été les principaux responsables de la disparition de la forêt semi-xérophile et de la végétation de savane arborée semi-aride de l'ouest, du décapage corrélatif des sols bruns et donc de l'accentuation des pierriers généralisés tels qu'on les observe maintenant et où l'on imagine mal que le café puisse pousser actuellement sans irrigation.

Il faut ajouter également les coupes de bois qui alimentaient les multiples fours à chaux de la côte sous le vent, source de calcaire corallien. Actuellement, la «forêt» semi-xérophile ne se trouve plus que sur certains flancs de ravines et dans les zones montagneuses (la Grande Chaloupe) où elle se rétrécit inexorablement du fait des feux, des pestes introduites et de l'activité des «tisaneurs».

L'ère du café commercialisé par la Compagnie des Indes se termine en 1 767. Les dernières plantations disparaissent en 1 829, du côté de Saint-Leu.

Une nouvelle étape importante, à la suite de la «guerre des Indes» et de l'occupation anglaise (1 810-1 815), est le traité de Paris (1 815) qui voit l'île de France (Maurice) et Saint-Domingue devenir propriétés de l'Angleterre, la France ne gardant que Bourbon. Disparaissent ainsi, avec la Compagnie des Indes, le débouché vivrier que

constituaient l'île de France et la source de sucre que représentait Saint-Domingue pour la France.

La Réunion s'oriente alors à fond, à partir de 1 815, vers la culture de la canne à sucre qui allait devenir quasiment de la monoculture, après une totale reconversion agricole. La canne succède au café et monte plus haut en altitude, entamant une nouvelle tranche importante des «bois de couleur». En 1 860, époque du record de superficie plantée en canne (91 000 hectares), celle-ci allait de la mer jusque vers 650 m d'altitude, entre Saint-Denis et Piton Sainte-Rose, donc bien au-delà de la limite actuelle. La large frange de végétation secondaire à goyaviers et jamrose qui, dans cette région, s'intercale actuellement entre la forêt hygrophile d'altitude et la bande sucrière aurait donc pour origine la culture de la canne puis sa régression par suite de l'intensification des méthodes de culture, et enfin la recolonisation par les espèces introduites.

Dans l'ouest, la canne montait déjà de 300 jusqu'à 800 m. Le domaine de la monoculture sucrière partout dans l'île, après le café, repousse encore un peu plus vers le haut la forêt naturelle. Entre 1 825 et 1 848, il y avait 100 à 200 petites sucreries qui n'utilisaient pas encore la bagasse comme combustible. Il s'ensuit que la forêt située au-dessus de la bande sucrière (600/800 m) était déjà profondément «mitée» par l'exploitation de bois destiné à alimenter les moulins.

Le charroi était assuré exclusivement par les boeufs dont le cheptel était alors important. En dehors de la saison de récolte, les bêtes trouvaient eau, herbe et climat sain dans les pâturages naturels d'altitude. Peut-être faut-il voir là, le début des grands incendies au-dessus de 1 500 m dans l'ouest sous végétation à Philippia et tamarins. Les feux allumés en saison sèche dans les bruyères ultra-combustibles ont pu couver en persistant très longtemps (quelques mois à plusieurs années d'après les récits), se propageant lentement et inexorablement dans la litière malgré les pluies. Le nom de «brûlés», donné à certaines de ces zones hautes, témoigne de ces incendies. Le plus récent date de 1 988, en contrebas du Piton Maïdo et du Grand Bénard.

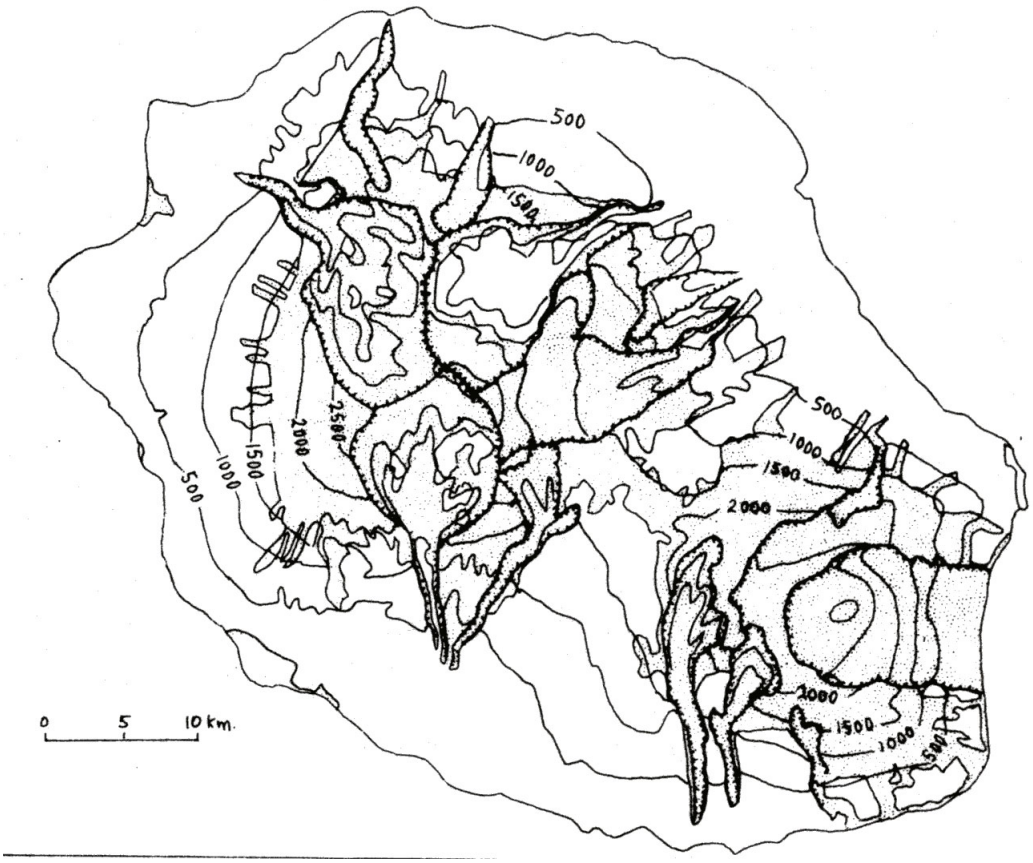
4.1.1 Début de l'occupation agricole des «Hauts»

Une des conséquences du déséquilibre provoqué par la monoculture de la canne en dessous de 700 m d'altitude, et par l'accélération de la démographie, a été l'insuffisance de terres à consacrer aux cultures vivrières. D'autre part, l'abolition de l'esclavage, en 1 848, a entraîné la concentration des propriétés sucrières familiales en grands domaines, donc l'émergence d'une population sans terres : «petits blancs» ne pouvant payer des «engagés» et anciens esclaves.

Dès 1 830, avec Salazie et Cilaos, mais surtout à partir de 1 848, dans la Plaine des Palmistes et dans la Plaine des Cafres, les «Hauts» ont commencé à devenir un exutoire à une crise sociale latente, devenant un lieu de redéploiement des cultures vivrières et de l'élevage. Les Hauts n'étaient auparavant que le refuge traditionnel des esclaves «marrons» qui y vivaient à l'état très dispersé. La Plaine des Cafres, autrefois couverte de Tamarins, a été défrichée dans la 2e moitié du XIXe siècle et est restée traditionnellement consacrée à l'élevage (parcours de bovins et d'ovins). La Plaine des Palmistes a été à cette même époque défrichée de sa forêt de «bois de couleur» dans sa partie amont, alors que sa partie aval, à formation très hygrophile à Pandanus montanus non cultivable, a été très vite épuisée totalement de ses «Palmistes» fort prisés.

En dehors des Ilets des Cirques et des Hautes Plaines, les «défrichés» pour les cultures vivrières (maïs, haricot, pomme de terre, etc.), maraîchères et fruitières, s'étendaient partout au-dessus de la zone sucrière, empiétant un peu plus sur la forêt naturelle. Cette progression n'a été stoppée qu'en 1 870 - une fois la Réunion devenue une «colonie», en 1 860 - année de la création de la zone domaniale (fig. 4.1) protégeant un domaine haut forestier appartenant à l'Etat et géré par les Eaux et Forêts puis par l'ONF (Office National des Forêts).

FIG. 4.1 – *Extension du «domaine» (superficie = 100 000 hectares)*



(.jpg)

TAB. 4.1 – *Superficies des espaces naturels, agricoles et urbains*

1 - ESPACES NATURELS			
	Forêts mégathermes semi-xérophiles	:	2 000
	Forêts mégathermes hygrophiles	:	14 000
FORETS	Forêts mésothermes à ¡¡Bois de Couleur¿¿	:	34 000
NATURELLES	Forêts mésothermes à tamarins (naturels)	:	5 800
(60 800 hectares)	Forêts mésothermes très hygrophiles	:	5 000
	Goyaviers et jam-rats	:	12 000
VEGETATION	Fourrés semi-xérophiles	:	7 500
'SECONDAIRE	Savanes herbeuses semi-xérophiles	:	7 500
(31 500 hectares)	Boisements à Acacia decurrens	:	4 500
REBOISEMENTS	Camphriers	:	400
ET REGENERATIONS	Tamarins	:	1 700
(5 500 hectares)	Filaos	:	600
	Cryptomérias	:	2 800
LAVES NUES OU PEU COUVERTES	Landes éricoïdes et pelouses d'altitude	:	14 000
(26000 hectares)	Laves nues ou à espèces pionnières	:	12 000
ZONES ESCARPEES	Remparts et flancs de ravines	:	34 000
(46000 hectares)	Versants et Escarpements très ravinés	:	12 000
ESPACES AQUATIQUES (3 200 hectares)	Lits majeurs + lacs + marais	:	3 200
PLAGES ET ROCHERS LITTORAUX (500 hectares)		:	500
	TOTAL = 173 500 hectares		
2 - ESPACES AGRICOLES			
CANNE A SUCRE		:	42 000
CULTURES MARAICHERES, VIVRIERES, FLORALES, TABAC		:	7100
GERANIUM		:	2 700
ARBORICULTURE		:	2 000
VETIVER		:	150
VANILLE		:	800
PRAIRIES		:	4 000
PARCOURS		:	2 000
	TOTAL = 60 750 hectares		
3 - ESPACES URBAINS			
	TOTAL = 16 750 hectares		

En dehors des cultures mentionnées, ont été introduites des cultures nouvelles à essences : vanille (1 841), géranium (1 860), ylang-ylang (1 880), vétyver (1.900).

La période 1 860-1.945 a été une période de récession, de tâtonnements, d'essais infructueux causés par de multiples facteurs : démographiques, sociaux, économiques (concurrence extérieure de la canne, chute des cours, maladies de la canne, blocus pendant la guerre, etc.). Le redressement n'a eu lieu qu'après 1.946, date de la départementalisation.

4.1.2 L'arrivée du géranium

Il a été introduit dès 1 860 dans l'est (Hauts de Sainte-Marie) puis sur les Hauts de la Montagne jusqu'en 1 880, ensuite dans les Hauts du Tampon (1.900), qui marque le début du «rush», et enfin dans les Hauts de l'Ouest à partir de 1.920.

Ces différentes étapes sont essentielles dans l'histoire de la déforestation de l'île. C'est avec le géranium, au-dessus de 1 000 m et jusqu'à 1 600 m dans l'ouest et le sud-ouest, un peu moins haut dans le sud (1 000 m à la Crête) et le nord (900 m. à Sainte-Marie), qu'a été entreprise la destruction totale et irréparable d'une grande partie des «bois de couleur» des Hauts et des Tamarins (dans l'ouest pour ces derniers).

Autrefois, dans les parties hautes, les défrichements se faisaient à la main et les arbres étaient brûlés, après quoi, on faisait du géranium en culture itinérante extensive, semé «au trou», durant quelques années, avant de remettre en jachère boisée. Vers les 1 400-1 700 m le Tamarin repartait ; puis on a introduit l' Acacia decurrens qui a rapidement pris le dessus sur le Tamarin (photo A.37). Ce système de culture n'était pas trop perturbant pour le sol dont la fertilité et l'épaisseur se maintenaient à peu près. Dans la frange inférieure (800 - 1 100 m), l'agriculteur faisait souvent une rotation avec la canne à sucre, cette dernière reconstituant la structure du sol.

Depuis une dizaine d'années, le géranium est cultivé de façon de plus en plus intensive en monoculture, semé sur sillons. Les vieilles friches à Acacia sont défrichées brutalement à l'aide d'engins lourds. De telles pratiques, sur des pentes fortes (20 à 30 %), sur des andosols particulièrement entraînables (flottation des micro-agrégats) et sans pratiques anti-érosives, occasionnent une érosion de surface particulièrement alarmante pour les années à venir, si rien n'est fait pour la contrecarrer. Nous verrons que les andosols de la Réunion, bien que généralement épais (issus de cendres volcaniques) sont très fragiles ; une fois l'horizon «A» de surface (humifère et structuré) décapé, affleure l'horizon «B», jaune, qui est quasiment stérile (absence d'aération, problèmes physico-chimiques).

A l'heure actuelle, les préoccupations des organismes de développement, aidés par la recherche (CIRAD (A.3)) et les services d'animation rurale, sont : la promotion de sysèmes de cultures plus diversifiés, de couverture permanente, d'association de cultures, d'amendements organiques, d'élevage associé.

4.2 La série mégatherme semi-xérophile

Les formations de cet étage caractérisaient autrefois tout le secteur occidental (sous le vent) jusqu'à 700-800 mètres d'altitude, entre SaintDenis et Saint-Pierre et une partie (jusqu'à 1 100 m) des cirques de Cilaos et Mafate. La pluviométrie y est inférieure à 1 500 mm. La saison sèche est longue, avec 5 à 7 mois à moins de 50 mm. A l'origine, il semble qu'il y ait eu deux types de couvert végétal :

- une bande littorale, jusqu'à 150/200 mètres d'altitude, de savane arbustive ou arborée,
- une zone principale, au-dessus de 150/200 mètres, essentiellement forestière semi-xérophile.

4.2.1 La savane littorale de basse altitude

Elle correspondait à la zone la plus sèche de l'île, avec moins de 1 000 mm de pluviométrie annuelle et jusqu'à 7 mois à moins de 50 mm, c'est-à-dire la bande comprise entre La Possession et Saint-Pierre. Il s'agissait probablement d'une savane graminéenne piquetée de (Latania lontaroides)Lataniers endémiques et de Terminalia bentzoeBenjoins indigènes , deux espèces ayant presque complètement disparu à l'état naturel pour la première et subsistant sous forme de quelques individus (parois de ravines, cirques de Mafate et Cilaos) pour la seconde. Ces espèces poussaient sur un milieu édaphique pauvre et sec, à sols rocailleux vertiques où dominait le Benjoin, ou bien à sols sablo-caillouteux (cônes de déjection, sables littoraux) plus favorables au Latanier. Très tôt

(dès la fin du XVIé siècle), cette bande littorale fragile a été dégradée par les animaux introduits (chèvres en particulier) et par les feux de brousse, allumés pour les regains de pâturage.

A l'heure actuelle, les cônes de déjection à galets (Rivière des Galets et Rivière Saint Etienne) et les affleurements rocheux («tufs» de Saint Gilles, coulées décapées) sont occupés par une maigre savane herbeuse à Heteropogon contortus et Bothriochloa pertusa qui brûle régulièrement en fin de saison sèche (photos A.17, A.18, A.19).

Localement cette savane peut être enrichie en espèces arbustives secondaires allochtones :

- Sur les sols argilo-rocailleux à tendance vertique
  - Acacia famesiana (zépinard)
  - Prosopis juliflora (Algaroba) assez abondant à l'est et au sud de Saint Gilles-les- Bains (plateau Carrosse) ; il a été introduit sans succès au début du siècle comme fourrage.
  - Dichrostachys cinerea, formant un fourré épineux extrêmement dense à la Pointe des Châteaux.

  Tous ces épineux sont des légumineuses mellifères qui ont en principe un rôle bénéfique sur les sols ou en tout cas ce qu'il en reste.
- Sur les sols mieux drainants (bruns ferruginisés peu épais et caillouteux) coincidant avec des pentes supérieures à 10 % et allant jusqu'à 40 %, on trouve essentiellement. Leucaena leucocephala (cassi) formant toujours des fourrés assez denses, à feuilles caduques.
  - Albizia lebbeck (bois noir) également à feuilles caduques.
  - Furcraea foetida (agave = «choca vert») à très fort pouvoir de dissémination.
  - En position ubiquiste vis à vis du sol, on trouve surtout : Pithecellobium dulce (tamarin de l'Inde) associé soit à Leucaena sur sols rouges, soit aux épineux sur sols vertiques.
- Les cordons sableux (Saint Gilles à Trou d'eau, Etang-Salé) sont reboisés en Casuarina equiselifolia (filao) associés parfois au Albizia lebbeck (bois noir). En bordure de mer immédiate, sur sables ou galets fortement exposés aux embruns, prospère une plante rampante halophile : Ipomea pes-caprae («Patates à Durand»).

4.2.2 La forêt semi-xérophile de moyenne altitude (200-800 mètres)

La végétation naturelle telle qu'elle était avant l'arrivée de l'homme ne susbiste qu'en de rares endroits encore protégés (pour combien de temps ?) de l'invasion par les «pestes» introduites, des feux et des défrichements essentiellement dans les zones montagneuses et les profondes ravines du Massif de La Montagne (Grande Chaloupe), sur les flancs les plus inaccessibles de quelques ravines de l'ouest et localement dans les cirques de Mafate et Cilaos jusque vers 1 100 mètres d'altitude.

La composition de la forêt semi-xérophile comprend des espèces strictement spécifiques de ce milieu (environ la moitié) mais aussi des espèces plus ubiquistes que l'on retrouve aussi bien dans la forêt mégatherme hygrophile (voir plus loin). Parmi ces dernières, on trouve :

- Mimusops maxima (grand natte)
- Diospyros borbonica (bois noir des Hauts)
- Ochrosia borbonica (bois jaune)
- Olea lancea (bois d'olive blanc)
- Erythroxylon laurifolium (gros bois de rongue)
- Elaeodendron orientale (Bois rouge).

Les espèces arborées et arbustives spécifiquement semi-xérophiles sont essentiellement les suivantes :

- Securinega durissima (bois dur)
- Cossignia pinnata (bois de juda)
- Olea europaea subsp. africana (bois d'olive noir)
- Dodonea viscosa (bois de reinette)
- Pourpartia borbonica (bois blanc rouge)
- Eugenia buxifolia (bois de nèfles)
- Ficus rubra (affouche batard)
- Dombeya acutangula (mahot tantan)
- Ficus reflexa (affouche rouge).

Parmi les espèces très rares, menacées de disparition et en principe protégées, on trouve (J. DUPONT et J.C. GIRARD) :

- Foetidia mauritiana (bois puant)
- Tabemaemontana persicariaefolia (bois de lait)
- Zanthoxylum heterophyllum (poivrier des Hauts)
- Hibiscus columnaris (mahot rempart)
- Ruizia cordata (bois de senteur)
- Erythroxylon hypericifolium (bois d'huile)
- Poupartia borbonica (bois blanc rouge)
- Gastonia cutispongia (bois d'éponge)
- Obetia ficifolia (bois d'ortie)
- Pyrostria oleoiaes (bois mussard)
- Scolopia heterophylla (bois de prune)
- Dombeya populnea (bois de senteur)
- Indigofera ammoxylon (bois de sable)
- Stillingia lineata (bois de lait)
- Carissa xylopicron (bois amer)
- Croton mauritianus (Ti bois de senteur)
- Tournefortia arborea
- Abutilon exstipulare (mauve)
- Clerodendron heterophyllum (bois de chenilles)
- Eugenia mespiloides (bois de pêche marron)
- Lomatophyllum macrum (mazambron marron).

4.2.3 L'intervention de l'homme: cultures et végétation secondaire

La végétation originelle occupe actuellement très peu d'espace. On peut supposer qu'elle couvrait le panneau occidental entre 200 et 700 mètres d'altitude. C'est la formation qui a été détruite le plus tôt ou exploitée en priorité à partir de l'arrivée de l'homme vers 1 646 : bois d'oeuvre, dégradation par le pâturage extensif (chèvres surtout), défrichements pour les plantations de café jusqu'à 600 mètres d'altitude (à partir de 1 720 jusque vers 1 829), puis culture de la canne à sucre à partir de 1 815, jusqu'à 800 mètres. Actuellement la bande 300-700 mètres est quasi exclusivement sucrière (Fig. 4.2), excepté sur les flancs de ravines, les escarpements d'origine tectonique et les versants à pentes fortes, supérieures à 35 %.

Ces milieux sont alors occupés (photo A.17) par une association d'espèces secondaires introduites formant des fourrés arbustifs denses à Leucaena leucocephala (cassi), Pithecellobium duice (tamarin de l'Inde), Albizia lebbeck (bois noir), Furcraea foetida (choca vert), ces 4 espèces surtout en dessous de 350 mètres, alors qu'au-dessus, il s'agit essentiellement de Litsea glutinosa (avocat marron), Schinus terebenthifolius (faux poivrier ou encens), Hyptage benghalensis (liane papillon), Lantana camara (galabert). A la limite supérieure de l'étage (600-800 mètres) et sur les parois plus humides des ravines, peuvent se mêler Psidium cattleianum (goyavier) et Syzygium jambos (jam-rosat), espèces secondaires (plutôt hygrophiles), les plus fréquentes dans l'île.

Au-dessus de 350 mètres d'altitude, le sols étant déjà assez épais, la strate graminéenne, abondante dans les clairières et les jachères, plus rare en sous bois, est riche en Themeda quadrivalvis (teinte rousse) et Panicum maximum.

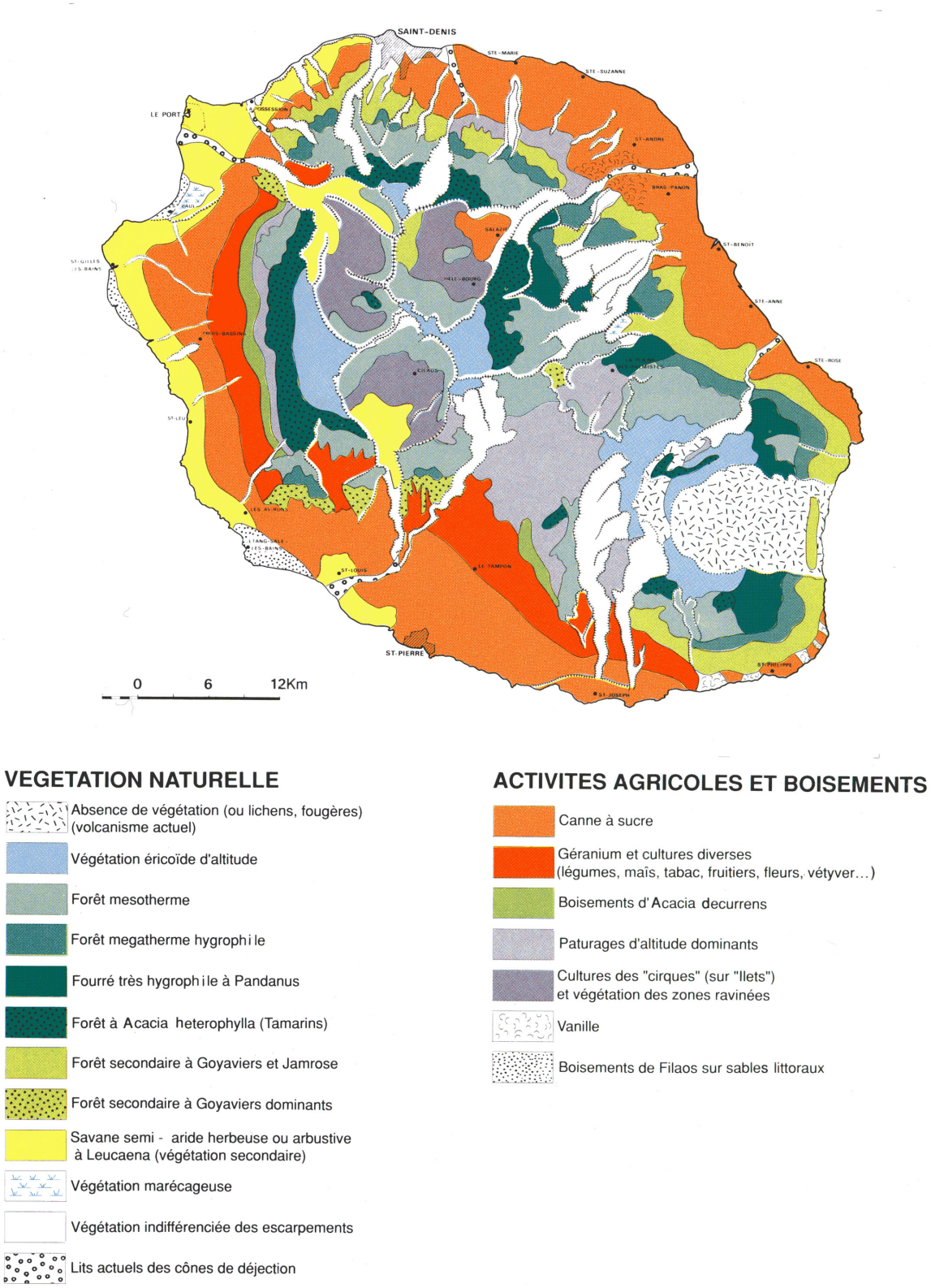
En dessous de 350 mètres, sur sols peu épais et rocailleux, dominent Heteropogon contortus et Bothriochloa pertusa (teintes jaunes). On passe alors à la Savane littorale parcourue régulièrement par les feux.

4.3 La série mégatherme hygrophile

La «forêt complexe» sempervirente à «bois de couleur» des zones humides de basse et moyenne altitudes formait à l'origine une ceinture continue autour de l'île :

– côte au vent, entre Sainte Marie et Saint-Joseph.
  Elle commençait au niveau de la mer pour grimper jusque vers 800 mètres d'altitude.

FIG. 4.2 – *Végétation naturelle primaire et secondaire et activites agricoles (d'après Th. Cadet)*



(.jpg)

– côte sous le vent, de Saint-Denis à Saint-Joseph.
  Elle commençait au-dessus de la forêt semi-xérophile vers 800 mètres d'altitude, jusqu'à environ 1 100 mètres, y formant donc une frange plus étroite.

Cette série correspond à une pluviométrie annuelle supérieure à 1 500 mm, une température moyenne annuelle comprise entre 18 ° et 23 ° (littoral).

Sur la face «au vent», la saison sèche (mois à moins de 50 mm de pluie) est inexistante. Sur la face protégée des alizés, spécialement entre les Hauts de la Possession et les Hauts des Avirons, il peut y avoir 5 mois de saison sèche, mais ces derniers sont alors compensés par les précipitations occultes (brouillards, rosées) et une hygrométrie assez élevée.

4.3.1 Localisation des reliques actuelles (1.989)

La majeure partie de la forêt a été détruite pour faire place à la culture de la canne à sucre, surtout à partir du début du XIXè siècle. Dans l'ouest et le sud, le relais a été pris par l'introduction du géranium dès 1.900 (1 880 à la Montagne).

Les vestiges les mieux conservés sont situés sur les laves récentes, peu propices aux cultures, situées en amont de Saint-Philippe (photo A.6), entre Basse-Vallée et le Rempart du Tremblet (Brûlé du Baril, Mare-Longue).

En dehors de ce témoin, les autres reliques sont les suivantes :

– Rempart de la Rivière Langevin
– entre Piton Sainte Rose et Saint-Denis vers 600-800 mètres d'altitude, frange coincée entre les fourrés secondaires à goyaviers et jam-rosats (aval) et la forêt mésotherme (amont):
  – Hauts de Sainte-Rose vers 600-800 mètres d'altitude (base de la forêt Mourouvin) sur planèzes à andosols sur cendres de la Fournaise.
  – Hauts de Saint-Benoît (massifs du Cratère, de la Caroline-Eden, du Morne du Bras des Lianes), sur reliefs de dissection de la phase II du Piton des Neiges, ferrallitisés.
  – Hauts de Sainte Suzanne et de Sainte Marie, essentiellement sur planèzes à andosols (cendres du Piton des Neiges).
  – Hauts de Saint-Denis (Saint-François, Moufia) sur reliefs ferrallitisés (phase II).
– Massif de la Montagne, dans la zone comprise entre 800 et 950 mètres d'altitude au-dessus des fourrés à goyaviers et en dessous de la forêt mésotherme. Les sols y sont à dominance ferrallitique (colluvions de pentes) sur volcanisme de la phase Il du Piton des Neiges.
– Tévelave-Makes-Dimitile : quelques reliques assez dégradées (envahissement par le goyavier) existent entre 600 et 800 mètres d'altitude, sur les reliefs accidentés de la phase Il du Piton des Neiges, à matériaux ferrallitisés.

La forêt n'est pas très haute : la strate arborescente a une taille moyenne de 7 à 15 mètres. Seuls quelques individus atteignent 20 mètres (Sideroxylon , Mimusops , Syzygium, Homalium). La hauteur moyenne de la forêt s'abaisse dans sa frange d'altitude supérieure, spécialement dans l'est, où alors les fougères arborescentes peuvent former la strate haute (photo A.5). La strate arbustive forme un gradient continu entre la strate arborescente et la strate herbacée.

Celle-ci est surtout constituée de jeunes plants des espèces ligneuses et de fougères. Les épiphytes, assez nombreuses, sont essentiellement des fougères et des orchidées. Il y a peu de plantes parasites. Les lianes sont peu nombreuses (une est très rare : Hugonia serrata.

4.3.2 Les principales espèces ligneuses

En gros, 33 % des espèces sont spécifiquement mégathermes hygrophiles, 24 % se retrouvent aussi dans le secteur mégatherme semi-xérophile (ce sont les mégathermes hygro-indifférentes) et 43 % sont communes à la série mésotherme (ce sont les «Eurythermes»).

Les mégathermes ligneuses hygrophiles

Parmi les espèces ligneuses, on trouve essentiellement :

- Labourdonnaisia calophylloides (petit natte)
- Cordemoya integrifolia (bois strictes de perroquet)
- Syzygium cymosum (bois de pomme)
- Tambourissa quadrifida v. micrantha (bois de tambour)
- Calophyllum tacamahaca (takamaka)
- Ficus densifolia (affouche)
- Psiloxylon mauritianum (bois de pêche marron)
- Dombeya ciliatamahot
- Mussaenda landia (quinquina pays)
- Syzygium cordemoyi
- Sideroxylon borbonicum v. capuronii (bois de fer blanc)
- Syzygium borbonicum
- Hyophorbe indica (palmiste poison)
- Casearia coriacea (bois de cabris rouge)
- Bernera borbonica (bois de raisin)
- Pandanus purpurescens (iracois marron).

Certaines espèces sont devenues rares :

- Drypetes caustica (corce blanc batard)
- Hemandia mascarenensis (bois blanc)
- Polyscias rivalsii
- Sideroxylon majus (vrai bois de fer)
- Xylopia richardii (bois de banane)
- Polyscias aemiliguineae (bois de papaye)
- Strongylodon siderospernum (cadoque)
- Pisonia lanceolata
- Claoxylon racemiflorum (grand bois cassant)
- Hibiscus boryanus (mahot batard).

Les mégathermes ligneuses «hygro-indifférentes»

Ces espèces n'ont pas de préférence spécifique quant à la pluviosité. Ce sont surtout Mimusops maxima (grand natte), Chionathus broomeana (coeur bleu), Diospyros borbonica (bois noir des Hauts), Elaeodendron orientale (bois rouge), Ochrosia borbonica (bois jaune), Agauria salicifolia (bois de rempart), Homalium paniculatum (corce blanc), Ficus rubra (affouche), Coffea mauritiana (café marron), Pittosporum senecia (joli coeur), Memecylon confusum (bois de balai), Tabernaemontana mauritiana (bois de lait).

Les «Eurythermes» ligneuses

Les espèces eurythermes ligneuses les plus courantes sont : Nuxia verticillata (bois maigre), Aphloia theiformis (change écorce), Molinaea altemifolia (tan georges), Antirhea borbonica (bois d'osto), Doratoxylon apetalum (bois de gaulette), Antidesma madagascariense (bois de cabri), Ocotea obtusata (bois de cannelle), Dracaena reflexa (bois de chandelle), Maillardia borbonica (bois de maman), Boehmeria macrophylla (bois de source), Weinmannia tinctoria (tan rouge), Vemonia fimbrillifera, Gaerlnera vaginata (losto café), Chassalia corallioides (bois de corail), Phyllanthus phyllirifolius (bois de négresse), Cyathea borbonica (fanjan ou fanjan mâle), Cyathea excelsa (fanjan femelle), Acanthophoenix tubra (palmiste rouge).

4.4 La série mésotherme hygrophile

On rentre là dans les forêts les plus «belles» et les mieux conservées de l'île. La forêt mésotherme commence bien entendu au-dessus de l'étage mégatherme, c'est-à-dire au-dessus de 900 à 1 100 mètres d'altitude (Fig. 4.2). A sa frange supérieure, elle passe à la végétation éricoïde oligotherme, vers 1 800 mètres.

Cette ceinture forestière est pratiquement continue sur les flancs externes de l'île. Elle est seulement interrompue dans la Plaine des Cafres (zone d'élevage) et la Plaine des Palmistes (élevage, cultures vivrières).

Ces zones de moyenne altitude ont une pluviosité élevée (supérieure à 2000 mm), sans vraie saison sèche sur les façades orientales. Seule la façade occidentale (1 500 à 2 000 mm) possède une saison sèche (4 à 5 mois à moins de 50 mm), toutefois compensée par l'humidité de l'air, les brouillards et les rosées. La température moyenne annuelle est comprises entre 14 et 17 ° C. Les zones situées au-dessus de 1 500 mètres subissent quelques jours de gels par an.

La série mésotherme hygrophile présente trois grands ensembles différents de formations végétales :

- la forêt complexe à «bois de couleur» (photos A.1 et A.5),
- les fourrés très hygrophiles à Pandanus montanus (photo A.50),
- la forêt à Acacia heterophylla (photo A.2).

4.4.1 La forêt complexe à «bois de couleur»

Elle représente à peu près 50 % de la superficie de cet étage. Sauf dans les hauts des massifs de la Montagne et de Saint-Denis, elle est pratiquement toujours développée sur un épais manteau de cendres volcaniques à andosols perhydratés.

La taille moyenne des arbres de la strate supérieure est de 6-10 mètres. Cette forêt est donc plus basse que la forêt mégatherme. La strate arbustive se distingue mal ; elle est constituée d'individus jeunes ou rabougris de la strate supérieure. La strate herbacée est plus abondante que dans l'étage mégatherme : ce sont surtout des fougères et des épiphytes débordant sur le sol.

Les épiphytes sont très exhubérants : fougères, orchidées, lichens, mousses, hépatiques, usnées, plantes vasculaires... (photo A.1).

Du point de vue des espèces, où dominent souvent de loin, les Dombeya («mahots») et un Cyathea (fougère arborescente) (photo A.5), on trouve essentiellement, parmi la flore ligneuse spécifiquement mésotherme : Dombeya ferruginea (petit mahot), Dombeya reclinata (mahot rouge), Dombeya ficulnea, Dombeya pilosa, Monimia rotundifolia (mapou), cyathea glauca (fanjan femelle), Claoxylon glandulosum (bois d'oiseau), Forgesia racemosa (bois de bibasse), Bertierarufa (bois de raisin), Chassalia gaertneroîdes (bois de corail), Tambourissa elliptica (bois de tambour), Badula grammisticta (bois de savon), Geniostoma angustifolia (petit bois cassant),

Psiadia boivini (bois de tabac), Faujasia flexuosa (liane zig-zag), Turraea ovata (gros quivi), Euodia obscura (catafaille), Sideroxylon borbonicum (bois de fer batard), Embelia angustifolia (liane savon).

Au sein de cette végétation se situent des espèces que l'on trouve aussi dans les étages mégathermes et oligothermes :

- Ainsi dans la moitié inférieure de l'étage mésotherme (entre 900 et 1 300 mètres d'altitude) on peut trouver des espèces déjà mentionnées telles Nuxia verticillata (bois maigre), Ocotea obtusata (bois de Cannelle), Aphloia theiformis (change écorce), Weinmannia tinctoria (tan rouge), Antirhea verticillata (bois d'osto), Gaertnera vaginata (losto café), Vernonia fimbrillifera, Phyllanthus phyllirifolius (bois de négresse), Cyathea borbonica (fanjan), Cyathea excelsa, Dracaena reflexa (bois de chandelle), Antidesma madagascariense (bois de cabri), Clematis mauritiana (liane marabit), Molinaea alternifolia (Tan georges), Doratoxylon apetalum (bois de gaulette).
- Dans la partie supérieure de l'étage mésotherme, se mélent des espèces plus caractéristiques des hautes altitudes : Senecio penicellatus, stoebe passerinoides (branle blanc), Senecio ambavilla (ambaville), Philippia montana (branle vert), Helichrysum heliotropiforma (velours blanc).
  Les bois de couleur de cet étage, rares et menacés de disparition comptent: Badula fragilis (bois de savon), Berenice arguta, Claoxylon setosum (bois d'oiseaux), Heterochaenia borbonica, Heterochaenia ensifolia , Trochetia granulata.

4.4.2 Les fourrés très hygrophiles à Pandanus montanus

Dans certaines situations à très forte pluviosité (plus de 4 500 mm), à drainage ralenti (pentes inférieures à 15 % ou substratum de coulées «pahoehoe», à andosols perhydratés sur cendres, à niveau «aliotique» profond plus ou moins continu fréquent), la végétation mésotherme prend un facies très particulier.

Il s'agit d'un fourré difficile à pénétrer, où domine une espèce caractéristique de 2 à 3 mètres de haut : Pandanus montanus (photo A.50). Celui ci est associé à des arbustes considérés comme «pionniers» : Helichrysum , Philippia arborescens, Geniostoma angustifolium, Senecio ambavilla.

Parfois émergent des Cyathea glauca (fougères arborescentes) et des Acanthophoenix tubra (palmistes). Une herbacée de 1 m à 1 m 50 de haut est très abondante : Machaerina iridifolia (sabre).

Les fourrés à Pandanus montanus occupent essentiellement :

- la Plaine des Lianes, le Mazerin, le Trou Malais.
- les hauts du massif du Cratère.
- la moitié aval de la Plaine des Palmistes.
- les hauts de Sainte Rose (au dessus de la forêt Mourouvin).
- les hauts de Saint Philippe, entre la Ravine Basse Vallée et le Rempart du Tremblet.

4.4.3 La forêt à Acacia heterophylla

L' Acacia heterophylla (tamarin des hauts), est une espèce endémique de l'île qui donne son cachet à beaucoup de forêts des hauts (au delà de 1 500 mètres d'altitude) intermédiaire entre la forêt de bois de couleur à feuillage sombre et les landes ericoïdes supérieures.

C'est un arbre de belle taille (jusqu'à 25 mètres de haut), à feuillage léger vert clair, laissant un sous-bois à ombrage assez «lumineux», d'accès facile, souvent couvert de fougères (Histiopteris incisa). On le trouve soit en forêt pure associé à Nastus borbonicus (calumet) en sous-étage, soit mélangé à des «bois de couleur» de la série mésotherme, soit enfin associé à des Philippia (photo A.2).

La graine de tamarin a la particularité de conserver sa capacité germinative très longtemps et de ne pouvoir germer qu'à la lumière. Sa régénération se fait donc dans des conditions très particulières ; elle est impossible dans les vieilles forêts fermées à ombrage dense qui montrent effectivement rarement de jeunes individus ; elle ne peut s'opérer que suite à des incendies ou défrichements.

Cela laisse à penser que la forêt à Acacia heterophylla est une formation pionnière, envahissant par le bas les zones faiblement couvertes d'altitude concurrement avec les Philippia générateurs «d'avoune» (voir plus loin), épais matelas semi-tourbeux de matière organique acide non humifiée.

Les forêts à Acacia heterophylla ne forment pas une ceinture continue dans les hauts de l'île. Les principaux ensembles sont les suivants :

- les planèzes du Grand Benard : bande quasi ininterrompue (1 500-1 800 mètres d'altitude) entre le rempart de la Rivière des Galets au nord et le rempart de Cilaos au sud.
- Plaine d'Affouche et planèze de la Roche Ecrite entre 1 700 et 1 800 mètres.
- Plaine des Fougères (1 600-2 000 mètres).
- parties aval des «Plaines» de Bébour et de Bélouve vers 1 500-1 600 mètres.
- fond de la Rivière de l'Est à 1 700-2 000 mètres d'altitude.
- Hauts de Saint Philippe vers 1 800 mètres.
- Hauts de Piton Armand (quelques lambeaux vers 1 700 mètres).
- Hauts de la Plaine des Cafres vers 1 750-1 800 mètres.

Dans la Plaine des Cafres subsistent au dessus de 1 600 mètres, un certain nombre de gros tamarins isolés dans les paturâges actuels et les landes secondaires à ajoncs. Ils témoignent de l'extension antérieure (avant 1.900) de la tamarinaie dans ce secteur.

«**Avoune et mascareignite**»

Nous reviendrons longuement sur ces «matériaux superficiels» lorsque nous parlerons des sols (Chap. 6). Etant en relation génétique étroite avec la phyto-écologie mésotherme et en relation spatiale avec les formations à tamarins et à Philippia, il nous faut en dire quelques mots ici.

- «**Avoune**» est un terme vernaculaire (origine malgache ?) qui désigne généralement, sous certaines forêts des hauts de la Réunion (quasi exclusivement dans le massif du Piton des Neiges), une couche organique noirâtre fibro-spongieuse, d'aspect tourbeux, de 1 à 2 mètres d'épaisseur.
  L'avoune est une accumulation de débris végétaux mal décomposés, noir et brun rouge, essentiellement alimentés par Philippia montana, auxquels se mêlent des bryophites (mousses, hépatiques, sphaignes) et de nombreux épiphytes qui prolifèrent sur les vieux troncs pourris jonchant le sol.
  L'avoune s'observe surtout sur les versants de moyenne altitude (plus de 1 300 mètres) de la façade nord-orientale de l'île sur cendres ou vieilles altérites. On peut la voir aussi bien sur planèzes faiblement inclinées que sur des crêtes étroites. Sa présence n'est donc pas corrélée avec un déficit de drainage externe : Plaine des Chicots, Plaine des Fougères, Plaine des Lianes, Ilet Patience, Bébour-Bélouve, nord de la Plaine des Cafres (Piton Tortue).
  Il semble y avoir une constance, ainsi que T. CADET (1.980) l'avait déjà remarqué, entre présence d'avoune et végétation initiale de Philippia montana, seule capable de former une litière épaisse de type «mor» très acide à très faible activité biologique.
  Lorsque l'avoune est présente sous forêt à «bois de couleur» ou sous tamarinaie (productrices d'humus doux), il y a toujours quelques reliques de gros Philippia. La végétation d'origine dans ces zones hautes semble donc être le haut taillis (3 à 4 mètres) à Philippia multiséculaires qui sont les véritables responsables de l'accumulation d'avoune. Donc dans beaucoup de cas, la végétation actuelle serait «décalée»

par rapport à son support organique qui, en «s'adoucissant» peu à peu, permettrait l'installation de bois de couleur. Ce serait le cas de la forêt de Bébour et de la Plaine des Fougères.

Dans les hauts du Massif de la Fournaise, on n'observe pas de véritable avoune malgré la présence locale de «fourrés» de gros Philippia (fond de la Rivière de l'Est, Bellecombe...). Cette végétation, développée sur cendres de moins de 5 000 ans, est probablement trop récente pour que l'accumulation commence à être significative.

Rappelons qu'au Piton des Neiges, les cendres surmontées d'avoune ont plus de 1 5 000 ans. On peut donc estimer qu'il faut 5 000 à 1 5 000 ans pour que s'accumule sous Philippia denses plus de 1 mètre d'avoune (des mesures au 14 C restent à faire).

– **La «mascareignite»**

C'est LACROIX (1.936) qui a dénommé ainsi ce matériau très particulier qui, à notre connaissance ne semble pas avoir été décrit ailleurs qu'à la Réunion.

Il s'agit d'un niveau superficiel extrêmement pulvérulent et léger, de couleur gris-clair à rosé, de consistance et d'aspect cendreux (photo A.33). On l'observe quasi-exclusivement sous tamarinaie, plus spécialement dans les Hauts de l'ouest et localement, au nord de la Plaine des Cafres.

La mascareignite est composée pour plus de 80 % de silice, sous forme de «phytolithes» d'opale (inclusions cellulaires végétales). On y trouve aussi quelques frustules de diatomées d'eau douce. Il n'y a pas de structure minérale directement originaire du substrat géologique (cendres volcaniques) ; la mascareignite dérive donc de la minéralisation poussée puis du lessivage de tout ce qui n'est pas silice, d'un épais niveau d'accumulation organique issu de débris végétaux très riches en silice. Il est difficile de voir là le résultat d'un processus d'ordre strictement pédogénétique par exemple une podzolisation. La podzolisation existe pourtant dans ces sols, nous le verrons ; elle ne se traduit pas par la formation d'horizons cendreux de surface, mais plutôt par des migrations profondes (aluminium, fer) accompagnant des acides organiques. Le fait que l'on n'observe jamais de «matériau intermédiaire» de transition, montrant encore la présence d'acides organiques, signifie que la formation de la mascareignite résulte d'un évènement drastique et brutal et non d'un processus lentement transformant qui est le propre de la pédogenèse.

A notre avis un tel évènement ne peut être que l'incendie à grande échelle, couvant et progressant lentement dans un niveau organique épais de type «avoune» à débris organiques riches en silice. La combustion totale, suivie d'un lessivage par les pluies au sein de cendres résiduelles, des éléments minéraux autres que la silice, suffirait à expliquer la formation de mascareignite.

Il reste cependant, d'une part, à identifier le type d'avoune d'où proviendrait la mascareignite et l'âge de ces éventuels incendies, d'autre part, à comprendre pourquoi la présence de mascareignite est liée à celle de tamarins (sans que l'inverse soit vrai).

T. CADET (1.981) pense, en accord avec d'autres auteurs, spécialistes de la végétation afro-alpine, que le bambou de la Réunion ou «calumet» (Nastus borbonicus) est une végétation secondaire qui s'installe sur des zones incendiées. Il est donc difficile de l'envisager comme générateur de litière productrice de mascareignite ; il serait venu au contraire après les incendies. Concernant Acacia heterophylla, il semble, là où on l'observe en association avec la mascareignite, qu'il se soit développé sur cette mascareignite déjà formée. En effet, les incendies dégageant des espaces ensoleillés et éliminant l'avoune, créeraient des milieux très favorables à la germination des graines de tamarin.

En conclusion, l'hypothèse qui nous semble la plus probable, est que la mascareignite dérive du brûlis d'une avoune formée sous Philippia, fougères et bryophytes associés. Les Philippia, riches en huile essentielle, sont particulièrement sensibles aux incendies. Tamarins ou/et calumets auraient colonisé ce support postérieurement. Ces espèces auraient ainsi pu venir dans l'île à une époque assez récente, suffisamment longue toutefois pour se spécialiser puisqu'ils sont endémiques (une espèce d'acacia proche du tamarin de la Réunion existe à Hawaï).

La mascareignite ne s'observe qu'en des secteurs à saison sèche assez marquée. Il est donc probable que de vastes incendies se soient propagés dans les fourrés à Philippia. Encore à l'heure actuelle, les hauts de SaintPaul sont régulièrement la proie du feu, lors des années très sèches. Nous reviendrons en détail plus loin sur la genèse de cette mascareignite.

4.5 L'étage oligotherme de haute altitude

La végétation «éricoïde» éparse des hautes altitudes couvre environ 1 /5 de la superficie de l'île. Elle commence, suivant les endroits, entre 1 600 mètres (Fournaise) et 1.900 mètres (Piton des Neiges).

Les températures moyennes annuelles (Fig. 3.10) sont comprises entre 16 ˚ C (1 600 mètres) et 6 ˚ C (3 000 mètres).

En août, mois le plus froid, les moyennes des minima absolus au sol seraient d'environ 0 ˚ à 1 600 mètres et -10 ˚ à 3 000 mètres. Les maxima absolus moyens (en février, mois le plus chaud) seraient pour ces mêmes altitudes, respectivement de 26 ˚ et de 17 ˚ . En altitude, la pluviométrie annuelle est supérieure à 1 500 mm (1 500 à 2 000 mm sur la façade ouest, 2 000 à 5 000 mm sur la façade est). Les hautes altitudes ne sont pas les zones les plus pluvieuses ni les moins ensoleillées, car situées souvent au-dessus de la masse nuageuse (photo A.7). Ainsi dans l'ouest (Grand Bénard), il peut y avoir 4 à 5 mois «secs» (moins de 50 mm). Ces facteurs, ajoutés à l'absence de sols ou leur faible épaisseur, à la perméabilité importante des matériaux (lapilli, pierriers, fissures) et aux pentes souvent fortes, font que ces milieux d'altitude sont édaphiquement secs, nécessitant une adaptation de la végétation dont certaines espèces présentent des caractères xérophiles.

4.5.1 Les situations bien drainées mais non excessivement sèches

La formation de base de haute altitude est le «fourré éricoïde», à touffes ou arbustes, composé essentiellement de (photo A.8)

- Philippia montana (branle vert)
- Stoebe passerinoides (branle blanc).

Le «branle vert» est la plupart du temps dominant, mais il est eurytherme, c'est-à-dire qu'on peut le trouver également à plus basse altitude. Le «branle blanc» est plus spécifique et peut devenir dominant sur pierriers et scories (Piton des Neiges, Grand Benard) au-dessus de 2 600 mètres, sous forme de touffes basses arrondies et blanchâtres, très caractéristiques.

Dans ce fourré éricoïde sont également présents, en densité variable, les plantes suivantes (arbustes ou touffes) :

- Phylica nitida (ambaville),
- Senecio hubertia (ambaville blanc),
- Hypericum lanceolatum,
- Philippia gatioïdes (thym marron),
- Helichrysum heliotropiforme (velours blanc),
- Faujasia pinifolia,
- Heterochaenia rivalsii(rare),
- Senecio squamosus(rare).

4.5.2 Les situations écologiques particulières

- Sur matériau très récent et très drainant de scories et lapilli peu stabilisés
  Il s'agit presque exclusivement de touffes très éparses de Cynoglossum borbonicum, première végétation qui s'installe avant même les lichens. On l'observe surtout sur les lapilli mouvants de la Plaine des Sables et les cônes très récents environnants.
- Sur matériau d'accumulation finement divisé (lapilli cendreux) en position horizontale ou de cuvette, à mauvais drainage

Ces sites sont généralement occupés par une «prairie altimontaine», toujours bien circonscrite (teinte jaune clair en saison sèche) au sein de la lande éricoïde. On y trouve (photo A.9) :

- des graminées que l'on observe aussi ailleurs à basse altitude à l'état très clairsemé
  Festuca borbonica, Agrostis salaziensis, Pennisetum caffrum, Panicum lycopodioides, Ischaenum koleostachys.
- des herbacées plus spécifiques
  Costularia melicoides, Carex borbonica, Helichrysum arnicoides, Poa borbonica, Huperzia saururus, Agrostis sp., Carpha sp..

Les sites les plus marécageux possèdent des hygrophytes (Carpa sp., Rhynchospora sp., Eteocharis sp., Lycopodiella affinis.

– Le groupement à Sophora denudata (petit tamarin des hauts)
  Le Sophora est un arbuste ou un arbre pouvant atteindre 7 mètres de haut, formant des groupements lâches et bosquets, souvent au-dessus de la forêt à Acacia heterophylla. On le trouve sur les flancs occidentaux du massif de la Fournaise sur les pentes moyennes nappées de Lapilli, jusque vers 2 200 mètres : entre les hauts de la Plaine des Cafres et le Rempart de Bellecombe, entre la Plaine des Sables et le fond de la Rivière de l'est.
  Il est alors associé à des fourrés et arbustes de la lande éricoïde (Philippia, Stoebe, Phylica, Senecio, Hypericum...) et parfois à des Acacia heterophylla épars de petite taille.
– Les groupements des surfaces rocheuses et des fissures
  Les dalles de coulées «pahoehoe», les pignons rocheux, les parois de falaises, sont peuplés de mousses en coussinets (Grimmia) et de lichens.
  Au-dessus de 2 600 mètres d'altitude, les petites anfractuosités des masses rocheuses, à débris organo-minéraux humides, sont colonisées par des mousses du genre Campylopus.
  Les fissures profondes à milieu hydrothermique plus constant et à faible éclairement abritent essentiellement des hépatiques et des mousses, sur les débris desquelles peuvent s'installer des fougères dont certaines se retrouvent en forêt mésotherme et d'autres sont spécifiquement oligothermes.

4.6 La végétation littorale

Nous regrouperons dans cet ensemble la végétation établie sur substrats divers (rochers basaltiques, sables, alluvions à galets ou argiles de décantation) et qui est soumise, soit aux vents marins chargés d'embruns, soit à l'hydromorphie d'une nappe plus ou moins salée dans les étangs situés à l'arrière des cordons littoraux à sables et galets.

4.6.1 La végétation d'extrême littoral

Les milieux littoraux se différencient par 4 composantes : le substrat, le modelé du front de mer, la pluviosité et l'exposition (vent et houle). La végétation y caractérise la frange d'action directe des embruns. Ceux-ci sont les plus forts sur la côte rocheuse des façades sud et sud-est de l'île. C'est en effet la zone la plus exposée aux vents violents et à la forte houle arrivant d'E-SE, cette dernière se brisant brutalement contre la falaise basaltique du front de mer. D'autre part la pluviosité y est élevée. D'après T.CADET (1.981), les groupements les plus caractéristiques sont les suivants :

- le groupement à Psiadia retusa (saliette)
  Il caractérise les falaises basaltiques subverticales et leurs talus de piémont escarpés du sud et du sud-est, directement exposés aux embruns violents. Psiadia retusa, arbrisseau très halophile, peut rester à l'état pur, tout à fait en pied de falaise ; il est endémique de la Réunion et est menacé de destruction ; la plupart du temps, il est associé à d'autres halophiles basses: Lycium tenue, Lepturus repens, Lysimachia

mauritania, Euphorbia goliana, Lobelia serpens. Un peu plus en arrière de la zone d'embruns maxima, Psidia est associé ou concurrencé par des espèces moins strictement halophiles : Scaevola taccada (veloutier vert), Pandanus purpurescens (Vacois), Casuarina équisetifolia (filao), Schinus terebenthifolius (encens) avec une graminée de sous-bois : Stenotaphrum dimidiatum (trainasse).

Deux espèces littorales deviennent rares : Tournefortia argentea (veloutier) et Delosperma napiforme (lavangère), cette dernière étant endémique.

– Le groupement à Zoizia tenuifolia (gazon bord de mer)

  Cette herbacée rase est spécifique des «trottoirs» rocheux bordant les falaises basaltiques de 2 à 10 mètres de haut du littoral humide, entre Langevin et Sainte Rose. Elle couvre une bande de 2 à 30 mètres de large soumise constamment aux forts embruns des vagues qui se brisent en contrebas. Le gazon couvre directement la dalle basaltique récente, quand celle-ci est de type «pahoehoe».

  Dans le biotope à Zoizia, on observe aussi en association des herbacées que l'on peut trouver ailleurs : Lysimachia, un écotype littoral de Centella asiatica, Selaginella obtusa.

  A l'arrière de la bande à Zoizia, se trouve généralement des boisements secondaires à «vacois» et filaos ainsi que des fourrés à Schinus.

– Le groupement à Ipomea pescaprae (Patate à Durand) et Cynodon dactylon (chiendent) :

  les «patates à Durand», à port rampant, caractérisent la face externe exposée des cordons littoraux à substrats sableux et à galets, quelle que soit l'exposition. Le chiendent, ubiquiste, lui est toujours plus ou moins associé. Sur la côte humide, ce groupement peut être envahi en partie par la graminée Stenotaphrum dimidiatum (trainasse) venue des sous-bois proches. Sur la côte plus sèche (sous le vent), il peut être associé à Dactyloctenium aegyptium (sur sable), Portulaca oleracea, Boehravia coccinea. Entre La Possession et Etang-Salé, la graminée semi-xérophile Heteropogon contortus peut arriver jusqu'à la frange à Ipomea.

– Le fourré littoral à Schinus terebenthifolius (encens)

  Schinus est un arbuste non spécifiquement halophile. Très abondant dans les fourrés secondaires de la zone sous le vent située entre 350 et 900 mètres d'altitude, il s'adapte aux vents et embruns et caractérise alors certains littoraux en prenant un port bas aplati. Il nécessite plus de 900 mm de pluviosité et un substrat sableux ou caillouteux (galets).

  On le trouve essentiellement sur les flancs internes des cordons littoraux, à l'arrière de la frange à Ipomea, entre Saint-Denis et Sainte Rose. Il peut remonter le talus ou la petite falaise qui domine directement le cordon. A l'arrière, il peut être associé ou remplacé par des «bacois» ou Filaos plantés.

  Les sous-bois à Schinus, à Pandanus et Casuarina sont occupés par Stenotaphrum dimidiatum (graminée).

4.6.2 La végétation des zones marécageuses

Les zones hydromorphes ou marécageuses littorales sont essentiellement :

– l'Etang de Saint-Paul (photo A.14),
– l'Etang de Bois-Rouge (Sainte Suzanne),
– l'Etang du Gol (photo A.40).

Ils sont tous liés à l'avancée en mer des vastes cônes de déjections (Rivières des Galets, Rivière du Mât, Rivière Saint-Etienne), ayant isolé sur leurs côtés des «culs de sacs», fermés postérieurement par des cordons littoraux et colmatés par des sédiments fins apportés par les ravines qui les alimentent (Fig. 1.3 et Fig. 9.1). Une nappe phréatique y est proche ou affleurante, douce ou saumâtre en surface, plus salée en profondeur.

Les alluvions fines de Bois Rouge et du Gol sont cultivées en canne pour leur majeure partie (nappe restant en dessous de 40 cm), seuls subsistant quelques résidus marécageux non drainés. Par contre l'Etang (Fig. 9.1) de Saint Paul représente jusqu'à 500 hectares.

la végétation aquatique

Mis à part les herbiers immergés à Najas, Hydrilla (Elodées), algues vertes ou mousses, on trouve localement une végétation aquatique flottante à Pistia, Lemna ou Eichhomia crassipes (jacinthe d'eau). La jacinthe d'eau peut proliférer et, entraînée aux exutoires, bloquer ces derniers.

La végétation sub-aquatique

Plusieurs groupements peuvent être distingués suivant la proximité des plans d'eau permanents profonds :

- Le groupement à Polygonum sp. (persicaire) et Coloccasia antiquorum (songe noir). Ce sont les plantes pionnières après les jacinthes d'eau, qu'elles finissent par étouffer.
  En dehors des étangs, la songe et le persicaire s'observent sur les berges des ravines et rivières à écoulements ou bassins permanents.
- Le Cyperus papyrus var. madagasceriensis (papyrus), en peuplements monospécifiques fermés très denses de 2 à 3 mètres de haut. Il est présent soit le long des berges des étangs soit en «îlots» ronds (photo A.14) à limites très nettes (Etang de Saint-Paul). L'étang du Gol n'en possède pas.
- L'association à Typha angustifolia, Cyperus articulatus et Eleocharis equisetina
  C'est le groupement le plus étendu, qui fournit de nombreux débris alimentant la sédimentation organique tourbeuse (Etang de Saint-Paul). On y trouve également une fougère aquatique (Cyclosorus interruptus) ainsi que 2 autres espèces Jussiena suffruticosa et Commelina diffusa (herbe de l'eau).
- L'association à Cyperus expansus, endémique à la Réunion et spécifique de certaines zones, plus rarement submergées, de l'étang de Bois-Rouge ; il est associé, en peuplement serré, à Cyclosorus, jussiena et Commelina.
- La végétation des sols rarement inondés
  Cette prairie à graminées (Paspalidium geminatum et Cynodon dactylon) caractérise les bordures des étangs de Saint Paul et du Gol.

4.7 La dynamique de colonisation des laves

4.7.1 Dans le secteur «mégatherme humide»- Grand Brûlé)

T. CADET a fait une remarquable analyse de cette dynamique, montrant bien la hiérarchie évolutive, des premières plantes pionnières jusqu'à la forêt climacique, ainsi que la stratification progressive du phyto-système. Nous reprendrons son analyse en considérant ce qui se passe en moyenne sur coulées «aa» (en gratons) à basses et moyennes altitudes.

Schématiquement, les coulées «a a» (en gratons) sans saupoudrage cendreux montrent plusieurs stades de colonisation, comme l'a bien indiqué T. CADET :

- A partir de la 2è année, les cavités humides non directement ensoleillées, se revêtent de mousses. En même temps, sur les parties superficielles exposées, commence à s'installer un lichen spécifique : Stereocaulon vulcani.
- Au bout de 8 ans, ce lichen recouvre totalement la coulée, sous un manchon blanc (pouvant subsister plus de 50 ans), qui, par son agressivité chimique, peut opérer une certaine désagrégation des gratons (photo A.67).
  Commence alors à s'installer entre les blocs une fougère héliophile (Nephrolepis abrupta).

- Au bout d'une douzaine d'années, suffisamment de débris organiques issus des fougères et des mousses maintenant l'humidité entre les fissures permettent l'enracinement des premiers arbres pionniers, en particulier Agauria salicifolia (bois de rempart). Une stratification se différencie alors progressivement :
  - strate de lichens (Stereocaulon vulcani) au soleil et de mousses à l'ombre,
  - strate herbacée à fougères dominantes (Nephrolepis abrupta) et Cyperacée (Machaerina iridifolia)
  - strate ligneuse très discontinue, à Agauria dominant, mais où commencent à apparaître d'autres arbustes : Antirhea verticillata (bois d'osto), Nuxia verticillata (bois maigre), Senecio ambavilla (ambaville).
- Au bout d'une cinquantaine d'années (?), les lichens disparaissent, la strate herbacée très dense est dominée par la fougère Dicranopteris linearis qui prend le pas progressivement sur Nephrolepis abrupta et Machaerina. La strate arbustive à Agauria, d'environ 5 m de haut, voit émerger la deuxième espèce ligneuse pionnière, qui est Sideroxylon borbonicum (bois de fer bâtard). D'après T. CADET (1.981), Sideroxylon ne se développe plus de nos jours que très lentement, à cause de la disparition de ses agents de dissémination (oiseaux spécifiques).
- Au bout de 150 à 200 ans, apparaît une belle strate arborée où Syderoxylon et Agauria, arbres dominants, atteignent une bonne taille (1 015 m) ; ils sont associés à Nuxia, Antirhea, Aphloia, Molinaea, Doratoxylon, Polyscias.
  A l'ombre, se développent des arbustes (Gaertnera, Pittosporum, Senecio, Chassalia), quelques fougères arborescentes (Cyathea borbonica) et palmiers (Acanthophoenix rubra). La strate herbacée est maintenant dominée par une nouvelle fougère plus ombrophile : Nephrolepis biserrata. Les épiphytes, mousses et hépatiques prolifèrent.
- Après 250 ans, la zone d'ombre du couvert arboré à Sideroxylon permet le développement de nouveaux arbres, dont Labourdonnaisia calophylloides (petit natte) qui devient l'espèce dominante. Les autres espèces arborescentes sont : Sideroxylon borbonicum et Agauria salicifolia (en gros et vieux individus clairsemés), Calophyllum takahamaka (takamaka), Syzygium bomonicum, Xylopia (bois de banane), Mimusops . Au niveau des arbustes d'ombre on trouve surtout : Casearia, Erythroxylon laurifolium (gros bois de rongue). Les fougères, épiphytes, mousses et lichens sont toujours très abondants. On arrive au stade de la forêt climacique. Il n'y a pas de sol minéral proprement dit, seulement une couche noirâtre de 10 à 20 cm d'épaisseur de débris végétaux mal décomposés mélangés à des fragments de «gratons» isolés par la prolifération racinaire.
- Au-delà de 300 ans, on est au plein développement de la forêt climacique (photo A.6) de laquelle disparaissent les premiers arbres pionniers (Agauria et Sideroxylon) qui, faute d'ensoleillement, ne peuvent plus se régénérer.
  La fougère Nephrolepis biserrata disparaît de la strate herbacée, passant au stade d'épiphytes, alors que s'implantent de nouvelles herbacées (Calanthe sylvatica, Pteris scabra, Asplenium lineatum).

4.7.2 Dans le secteur mésotherme («grandes pentes» de la Fournaise)

- Comme à plus basse altitude, au bout de quelques années, les coulées «aa» se recouvrent de lichens (Stereocaulon vulcani). L'humidité atmosphérique étant plus constante, la couche de lichen peut dépasser 10 cm d'épaisseur (photo A.67) et les anfractuosités se remplissent très vite d'hépatiques.
- Au bout de 8-10 ans, des fissures entre le lichen, émergent Machaerina
- Après 30 ans, on observe une strate arbustive pionnière discontinue à Stoebe passerinoides (branle blanc), Senecio ambavilla (ambaville), Geniostoma borbonicum (bois de rat), Agauria buxifolia, Psiadia boivini (bois de tabac). La strate herbacée importante (Machaerina et Blechnum) fait régresser Stereocaulon (heliophile).
- Puis, (après 50 ans ?), viennent les Philippia (branles verts) : Philippia arborescens et Philippia montana. La fougère Blechnum tabulare grandit et prend un port de Cycas. Pandanus montanus est également présent. La cyperacée Machaerina domine le strate herbacée, alors que Stereocaulon a disparu.
  Contrairement à l'étage mégatherme, la strate arborescente n'est pas encore développée. Au bout de 250 ans, alors que la forêt à Agauria et Sideroxylon de 10 m de haut est installée dans les Bas, seuls des

fourrés préforestiers de 2-3 mètres sont présents dans les Hauts : Antirhea, Gaertnera, Acanthophoenix, Cyathea glauca, Dombeya ficulnea, Sideroxylon borbonicum, Chassalia gaertneroiaes, Turraea ovata, Nuxia, Aphloia, Weinmannia.

– Le stade forestier mésotherme véritable nécessite plusieurs centaines d'années pour se former. Ce n'est qu'à partir de ce moment que prolifèrent les épiphytes.

4.7.3 Variations en fonction de la nature des coulées

Coulées «a a» et «pahoehoe»

Les séquences de végétation sont sensiblement les mêmes, mais il y a des différences relatives à la vitesse de colonisation.

Ainsi les coulées «a a» se tapissent plus vite et plus abondamment de lichens (Stereocaulon) que les coulées «pahoehoe».

Par contre, paradoxalement, les coulées à dalles lisses (toujours disloquées) sont colonisées plus rapidement par la végétation ligneuse que les coulées scoriacées chaotiques. Les nombreuses fissures des laves en dalles (souvent en gratons en dessous) semblent donc constituer un milieu édaphique (humidité) plus favorable que les anfractuosités situées entre les blocs scoriacés. Ceci est à court terme. A long terme (au-delà de plusieurs milliers d'années) les coulées «a a» sont plus avantagées concernant les vitesses de désagrégation et d'altération. Les sols s'y développent plus vite, et, à cette échelle temporelle, la forêt sur coulée «a a» doit être plus fournie que sur coulée «pahoehoe».

Variations tranversales aux coulées

Les coulées assez récentes présentent souvent une densité de ligneux plus importante sur les marges que sur les parties centrales. T. CADET en a proposé l'explication la plus vraisemblable, à savoir qu'en bordure, l'épaisseur de la coulée étant généralement moindre et sa dislocation supérieure («bourrelets»), les racines des arbres trouvent à ces endroits de meilleures conditions d'humidité et atteignent le substrat inférieur plus favorable.

Les conditions de drainage

Les coulées actuelles ou sub-actuelles sans placages cendreux sont toujours bien drainantes, qu'elles soient «a a» ou «pahoehoe». Ces dernières ne deviennent par endroits imperméables, sur topographie sub-horizontale, que si des retombées pyroclastiques fines postérieures colmatent les nombreuses fissures et que par surcroît un «pseudo-alios», cette fois pédogénétique, forme un plancher imperméable continu à la base. Les conditions hygro-climatiques favorables à cette pédogenèse ne se trouvent qu'à une certaine altitude. C'est le cas d'une partie de la Plaine des Palmistes, à Pandanus montanus, sur andosols perhydratés hydromorphes semi-tourbeux. La végétation en reste alors à ce stade. L'hydromorphie empêche le développement de la vraie forêt climacique à Labourdonnaisia. On ne peut pas alors vraiment parler de végétaion pionnière pour les fourrés à Pandanus montanus, puisque ceux-ci, du fait de leurs conditions édaphiques particulières se maintiennent même sur coulées de la phase IV du Piton des Neiges (70 000 à 100 000 ans).

4.8 La végétation secondaire et les «pestes» végétales

Depuis l'arrivée de l'homme, au milieu du XVlle siècle (et probablement avant, par débarquements d'animaux), la végétation naturelle de l'île a subi de nombreuses agressions, directes par destruction pure et simple (feux,

pâturages, exploitations forestières, mise en culture) ou bien indirectes par introduction (volontaire ou involontaire) d'espèces exotiques envahissantes, à dynamisme et pouvoir de dissémination supérieurs à ceux des espèces indigènes.

Nous avons déjà évoqué la végétation secondaire semi-xérophile, sur les versants ouest, entre la mer et 700 mètres d'altitude, (fourrés à Schinus, Litsea, Leucaena, Albizia, Furcraea, savanes à Heteropogon, Themeda, Bothriochloa, Panicum) et qui a presque partout remplacé la végétation climatique d'origine.

Il s'agit aussi de la végétation secondaire relativement hygrophile qui a plus spécifiquement envahi et remplacé en de nombreux endroits la forêt hygrophile à «bois de couleur», spécialement dans les zones de moyenne et basse altitude. Ce sont essentiellement, des fourrés denses à Psidium cattieianum (goyavier) et Syzygium jambos (jam-rosat), ces 2 espèces étant fréquemment associées. Ces fourrés forment une ceinture pratiquement continue au-dessus de la zone sucrière, entre les hauts de La Possession au nord et Langevin au sud, que ce soit sur coulées récentes ou sur volcanisme ancien disséqué à vieille altérations. Sur la façade occidentale, ces fourrés ne s'observent que dans les zones abritées, non cultivées, des flancs de ravines, entre 700 et 1 100 mètres d'altitude, associés aux fourrés à Schinus (faux poivrier ou «encens»), ou les prolongeant en amont. Etant moins exigeant en eau, sol et température, et se disséminant plus facilement, le goyavier est plus envahissant pour la forêt hygrophile à bois de couleur aussi bien mégatherme que mésotherme. Par contre Syzygium est plus abondant sur les flancs de ravines et dans les cirques.

4.8.1 Les «pestes» (envahisseurs biologiques)

Les «pestes végétales» sont des espèces introduites, à grand pouvoir de dissémination et à croissance rapide, qui menacent à terme la végétation naturelle, celle-ci ayant un rythme de reproduction et une vitalité inférieurs et souvent des exigences édaphiques plus strictes. A la Réunion, comme dans tout milieu insulaire de faible superficie et très contrasté, où la végétation naturelle s'est fortement diversifiée par sélection naturelle et présente un fort taux d'endémisme, l'introduction d'espèces exotiques concurrentes présente un grand danger pour la conservation du patrimoine génétique.

Certaines pestes sont assez ubiquistes, d'autres sont bien adaptées à certains milieux et donc peut être globalement moins menaçantes. Certaines prolifèrent très vite et sont très difficiles à combattre car leur dissémination peut être liée à une certaine faune avicole elle-même introduite. De sorte que le terme de «peste» est assez relatif dans son caractère de gravité. D'autre part certaines peuvent trouver une utilité et ne sont donc pas des «parasites totaux».

Les pestes les plus menaçantes sont les suivantes :

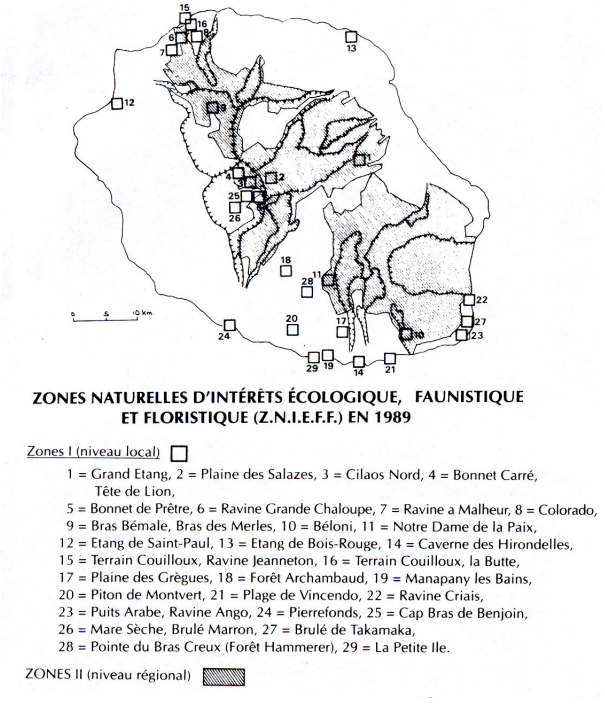
- Rubus alcaefolius (vigne marronne)
  Cette ronce, d'origine asiatique, introduite depuis au moins une centaine d'années, prolifère partout (excepté dans les zones sèches) et extrêmement rapidement sous forme de taillis très denses, sur les lisières et clairières des forêts mégathermes et mésothermes, le long des layons et sentiers assez larges, sur les cicatrices d'éboulements et défrichements (il s'agit d'une espèce de lumière), empêchant totalement la reconstitution de la végétation naturelle.
  Les graines, à long pouvoir de germination sont disséminées par les fientes des oiseaux. Peste la plus menaçante, aucun moyen de lutte efficace n'a encore été trouvé à la Réunion (photo A.3). En Australie, certains Rubus sont contrôlés par l'introduction d'une rouille européenne.
- Psidium cattleianum (goyavier)
  Il a été introduit du Brésil vers 1 818. Il forme des fourrés arbustifs denses. Il est ubiquiste en dessous de 1 500 mètres et pour une pluviosité supérieure à 1 400 mm. Le goyavier est très concurrentiel de la forêt à «bois de couleur». Il est même pionnier (avec le filao) sur les basses coulées du Grand Brûlé.
  Son pouvoir de dissémination par les oiseaux est élevé. Sur le versant nordoriental, la ceinture à goyaviers fait tampon entre la région sucrière et la forêt mégatherme qu'elle «ronge» peu à peu. C'est donc une vraie «peste» bien qu'il ait une certaine utilité, son fruit étant très apprécié.

- Solanum auriculatum (bringellier marron ou «tabac marron»)
  Cette solanée (originaire d'Amérique du Sud) à grandes feuilles velouteuses, a sensiblement la même écologie (bien que plus nitrophile) que la «vigne marronne». Elle grignote les forêts par les lisières et les clairières et empêche ainsi la régénération, mais elle est surtout rudérale.
- Lantana camara (galabert ou corbeille d'or)
  Originaire du Brésil, il aurait été introduit dans l'île vers 1 830. Il forme un fourré buissonnant épineux, héliophile, plus particulièrement envahissant dans l'ouest entre 600 et 1 200 mètres d'altitude. Les graines de galabert sont dispersées par les oiseaux (le «Martin» surtout). La lutte biologique (introduction d'insectes) aurait été efficace aux Fidji et en Australie.
- Hedychium gartnaerianum H. flavescens (longoses)
  Originaire des Indes, ces herbacées à longues feuilles et à rhizomes rampants, prolifèrent surtout dans les zones humides faiblement ensoleillées de moyenne altitude, en particulier à partir des berges de cours d'eau. On les trouve aussi dans les sous-bois où, par leur couverture dense, elles s'opposent à la régénération de la forêt. Les oiseaux dispersent les graines. Mais la prolifération des longoses peut résulter du fractionnement mécanique des rhizomes, qu'il faut donc éviter lors des travaux en forêt.
- Furcraea foetida (Kader ou Choca vert)
  Il s'agit d'un agave venant d'Amérique Centrale et introduit à la Réunion vers 1 830, sans doute à partir de Maurice. Le Kader envahit toutes les parois de ravines et flancs montagneux des zones semi-xérophiles, entre Saint Denis et Saint Pierre, les îlets abandonnés de Mafate et Cilaos. Il essaime très vite par dissémination de ses multiples bulbilles végétatifs qui, entraînés par le ruissellement, contaminent tout le versant aval.
  Il est dangereux spécialement à l'encontre des rares reliques de forêts semixérophiles indigènes qui s'accrochent encore sur des zones inaccessibles ou très accidentées de la Montagne, des remparts des Cirques, de certaines ravines de l'ouest.
- Hyptage benghalensis (liane papillon)
  Cette liane envahit les sous-bois des flancs de ravines, entre Saint Denis et Saint Gilles en dessous de 700 mètres d'altitude. Elle s'enroule autour des troncs et étouffe les arbres, constituant un danger pour les vestiges de la végétation originelle semi-xérophile.
- Ligustrum robustum var. Walkeri (Le troène ou privet)
  Introduit récemment pour la confection des haies à Cilaos, il se propage de façon inquiétante, par envahissement très rapide des sous-bois. Bien que localisé (en 1.988) seulement à Cilaos, il faut s'en préoccuper car on sait que les forêts humides indigènes de l'île Maurice ont été dégradées par la prolifération de cette peste dont les graines sont disséminées par un oiseau, le «Condé», lui-même introduit depuis peu dans le sud de la Réunion.

4.8.2 Autres espèces secondaires

- Litsea glutinosa (avocat marron)
  Arbuste envahissant, associé au Leucaena («cassi») en dessous de 500 mètres, sur les pentes de l'ouest ; il ne concurrence plus la végétation naturelle indigène puisqu'il n'y en a plus. Il a été introduit du sud-est asiatique au XIXe siècle.
- Leucaena glauca (cassi)
  Cette légumineuse arbustive ou arborée, originaire d'Amérique du sud, couvre de façon dense des flancs de ravines et versants entiers à sols bruns ferruginisés rocailleux dans l'ouest, en dessous de 500 mètres d'altitude. Associée souvent au «Kader» à «l'avocat marron» et au «bois noir des bas» (Albizia lebbeck), elle n'est plus, comme ces deux dernières, considérée.
  comme une peste, sauf sur des zones de la Montagne où elle peut concurrencer des restes de flore indigène. Ses feuilles sont appréciées des Cabris.
- Albizia lebbeck (bois noir des bas)
  Légumineuse arborée des bas-versants de l'Ouest, elle est actuellement plus utile que menaçante puisqu'elle ne sort pas de son écologie. Cette espèce d'origine Indienne a été introduite à partir de 1 720 pour l'ombrage des caféiers.

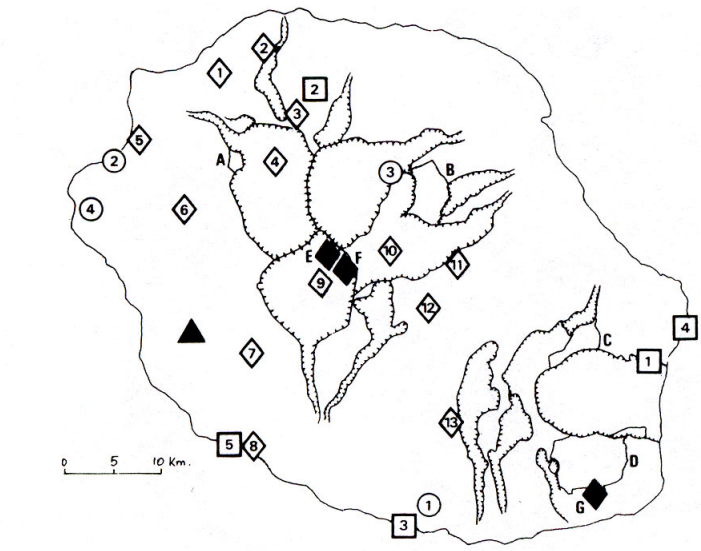
FIG. 4.3 – *Zones naturelles d'intérêts écologique, faunistique et floristique (Z.N.I.E.F.F.) en 1.989*



(.jpg)

– Prosopis juliflora (Algaroba)
  Légumineuse introduite d'Amérique du Sud vers 1.913, elle peut former des fourrés arbustifs denses en dessous de 200 mètres d'altitude entre La Possession et Etang Salé. L'algaroba ne se développe que sur des pentes faibles à sols argileux vertiques. Son extension ne pourra être que limitée.
– Dichrostachys cinerea (lanterne chinoise)
  C'est une légumineuse très épineuse qui forme des fourrés impénétrables, spécialement au niveau de la pointe des Châteaux, en dessous de 200 mètres, sur sols vertiques.
– Faux Poivrier ou encens Schinus (terebenthifolius)
  Il s'agit d'une anacardiacée originaire du Brésil et introduite au XIXe siècle, à la Réunion. Il forme des fourrés arbustifs assez hauts, souvent très denses sur certains versants pentus de l'ouest, entre 400 et 900 mètres d'altitude. Il est souvent associé à Litsea, Leucaena, Albizia, Lantana, Psidium.
  Avec ces dernières espèces, le faux poivrier a remplacé la végétation semixérophile d'origine. Il n'est donc plus menaçant, sauf vis-à-vis des quelques reliques originelles sur des versants inaccessibles.
– Syzygium jambos (jam-rosat)
  D'origine Indo-malaise, il aurait été introduit à la Réunion, comme arbre fruitier, à la fin du XVIIIe siècle. Souvent associé au goyavier, il est par contre dominant dans les ravines de la région au vent, où il fait disparaître les restes de forêt mégatherme.
– Casuarina equisetifolia (filao)
  Essence de lumière à croissance très rapide, le filao a été introduit en 1 768 à partir de Madagascar (origine antérieure : îles du Pacifique). Utilisé initialement pour la fixation des dunes entre Saint Paul et Saint Louis, il s'est répandu sur tout le littoral, et il s'est avéré particulièrement adapté à la colonisation des laves brutes en ° «gratons», dans la zone aval du Grand Brulé où il constitue (avec le goyavier) un colonisateur très efficace, bloquant le développement normal de la végétation naturelle. Sa dissémination se fait par le vent qui mobilise ses fruits ailés (Samares).
– Ulex europeanus (ajonc)
  Introduit (par un breton ?) d'Europe atlantique, il colonise essentiellement, au-dessus de 1 600 mètres d'altitude, la lande éricoïde du Grand Benard et la Plaine des Cafres (photo A.48).

FIG. 4.4 – *Réserves et sites protégés, existant ou en projet (1.989)*



RÉSERVES ET SITES PROTÉGÉS, EXISTANT OU EN PROJET (1989)

RÉSERVES

Réserves biologiques domaniales (R B D) existantes :
A = Hauts de Bois de Nèfles, B = Mazerin,
C = Mares et Sommet de l'Enclos, D = Hautsde Saint-Philippe.

Réserves naturelles (R N) existantes:
E = Grand Matarum, F = Piton Bleu, G = Saint-Philippe-Mare Longue

Réserves en projet :
1 = Ravine de la Grande Chaloupe, 2 = Colorado, 3 = Plaine des Chicots, Plaine d'Affouches,
4 = Bras Bémale, Bras des Merles, 5 = Etang de Saint-Paul,
6 = Les Palmistes, 7 = Bois de Bon Accueil, 8 = Etang du Gol,
9 = Rempart de Cilaos (y compris les réserves de Piton Bleu et du Grand Matarum), 10 = Bébour, 11 = Ilet Patience,
12 = Col de Bellevue, 13 = Notre Dame de la Paix.

ACQUISITIONS DU CONSERVATOIRE DU LITTORAL :
1 = Bois Blanc, 2 = Le Chaudron, 3 = Grande Anse,
4 = Anse des Cascades, 5 = Berges de l'Etang du Gol.

SITES HORS RESERVE A STATUT DE PROTECTION :
1 = Petite Ile, 2 = Grotte des Premiers Français, 3 = Voile de la Mariée,
4 = Ravine Saint-Gilles.

CONSERVATOIRE ET JARDIN BOTANIQUE DE MASCARIN

(.jpg)

4.9 Sylviculture : les reboisements et «régénérations»

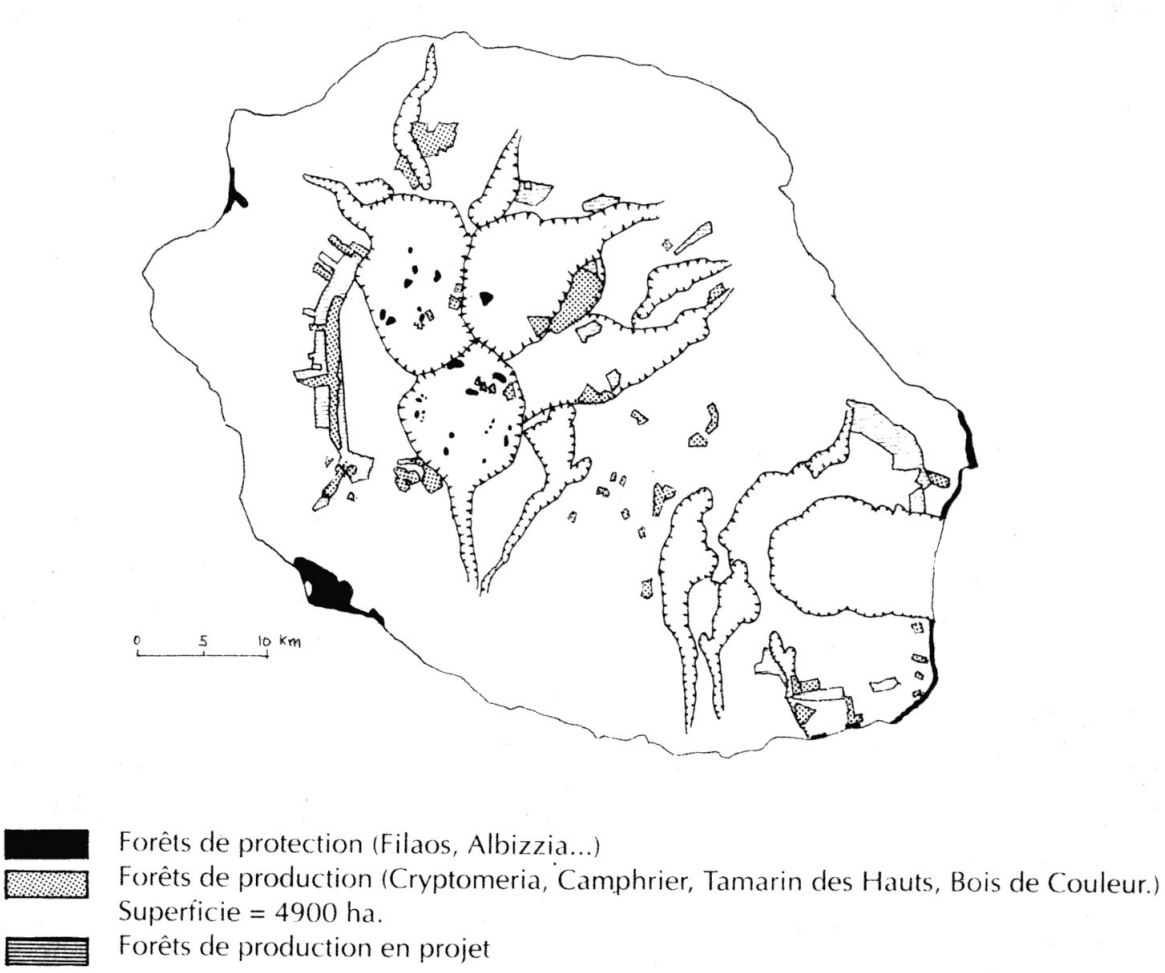
4.9.1 Reboisements en espèces exotiques

Un certain nombre d'espèces exotiques ont été utilisés par l'ONF (A.3) pour des reboisements de production ou de protection du milieu (Fig. 4.5). Certaines espèces indigènes sont en «régénération».

Par ordre d'importance spatiale il s'agit de :

- Cryptomeria japonica (cryptomeria). Résineux introduit en 1 880, le Cryptomeria couvre environ 2 600 ha (la moitié du domaine aménagé par l'ONF (A.3)), sur andosols, entre 900 et 1 600 mètres d'altitude.
- Cinnamomum camphora (Camphrier). Issu de Formose et du Japon, il a servi au reboisement (sur environ 400 ha) dans la région arrosée, et jusqu'à 1 000 mètres d'altitude à la Crête, Basse-Vallée (Saint Philippe), la Plaine des Lianes (Hauts de Bras Panon), dans le cirque de Salazie.
- Casuarina cunninghamiane (Filao de Nouvelle Hollande). Il a servi à reboiser des zones érodées de Cilaos et de Mafate.
- Casuarina equisetifolia (Filao pays). Ce Filao, originaire de Malaisie, boise une grande partie des sables littoraux du littoral ouest, de Saint Paul à Etang-Salé (où il stabilise les dunes). Actuellement malade et devenu envahissant sur les coulées récentes (Saint Philippe), il tend à être abandonné.
- Albizia lebbeck (bois noir). Planté sur les sables d'Etang Salé en remplacement du Filao (espèce d'origine Indienne).
- Cassia siamea (cassi du Siam). Des reboisements ont commencé à Etang-Salé.
- Grevillea robusta (grévillaire). Originaire d'Australie, cette espèce à croissance rapide a été utilisée en reboisements à Etang-Salé, Mafate et Cilaos.
- Pinus pinaster (pin maritime), utilisé en reboisement de protection dans certains secteurs de Cilaos, à côté du Filao.
- Pinus patula. Quelques plantations ont été réalisées dans la Plaine des Cafres.
- Eucalyptus globulus. Quelques reboisements dans la Plaine des Cafres.

FIG. 4.5 – *Forêts : réalisations et projets en 1.989 (sources : ONF (A.3))*



(.jpg)

4.9.2 «Régénérations» d'espèces indigènes

- Acacia heterophylla (Grand Tamarin des Hauts). Cette espèce, endémique de la Réunion est regénérée (sur environ 1 600 ha) entre 1 200 et 2 000 mètres d'altitude, dans les hauts de l'ouest et dans la forêt de Belouve. Un fort incendie en fin de saison sèche 1.988, (année très sèche) en a ravagé une partie, en aval des Grand et Petit Bénard.
- Terminalia bentzoe (benjoin). Cette espèce endémique des Mascareignes, et qui a presque disparu de l'île a l'état naturel (forêt mégatherme semi-xérophile), est en cours de régénération près de Saint Philippe.
- Mimusops maxima (grand natte). Endémique de la Réunion et de Maurice, cette espèce est en régénération à Saint Philippe.
- Labourdonnaisia calophyllouies (Petit natte)
  Ces 3 derniers «bois de couleurs» sont régénérés au total sur environ 500 ha, aux dépens d'ultimes reliques de forêt mégatherme hygrophile de basse altitude et avec affaiblissement de leur bio-diversité.

Chapitre 5

LES UNITES DE MILIEU DE HAUTE ALTITUDE (UNITÉS 1 A 4)

Ces paysages, d'une superficie d'environ 11 000 hectares, s'étendent au dessus de 1 800 mètres d'altitude, aussi bien au Piton des Neiges qu'à la Fournaise (Fig. **??**). Outre des sols peu épais (avec blocailles et nombreux affleurements de coulées), des températures basses, des pentes assez peu accentuées, les milieux d'altitude ont pour autre caractéristique commune une végétation ericoïde éparse, généralement basse, donnant une matière organique très acide. Ces landes à (photo A.8) Philippia et Stoebe («branles») correspondent assez exactement, du point de vue éco-botanique, à «l'étage oligotherme de haute altitude» (voir Chap. 4). L'altération, lorsqu'elle existe, n'est pas d'ordre géochimique, mais fait intervenir quasi exclusivement la matière organique. Celle-ci est productrice d'acides organiques ayant une action corrosive sur la roche elle-même (photo A.11) et dissolvante pour le fer au sein des pyroclastites. Ce fer s'accumule alors en liserés jaune caractéristiques imprégnant la surface des coulées qui forment le substrat (photo A.10). Compte tenu des conditions édaphiques difficiles, ces types de milieu n'ont aucune vocation agricole, si ce ne n'est, localement, le pâturage très extensif. A l'échelle de perception du 1/50 000, deux ensembles majeurs nous paraissent ressortir :

- Les cimes, au-dessus de 2 500 mètres d'altitude
- Les planèzes situées entre 1 800 et 2 500 mètres.

5.1 Milieux situés au-dessus de 2 500 mètres d'altitude (unité 1)

Pour ce dernier ensemble, les subdivisions inférieures tiendront compte de la nature du matériau superficiel. Ce sont les parties sommitales de l'île : planèzes supérieures du Grand Bénard (2 896 mètres), représentant 650 hectares, et Piton des Neiges proprement dit (3 069 mètres), avec environ 300 hectares. Le premier ensemble, en pente douce et régulière, est constitué (comme tout le flanc occidental de l'île), d'empilements de coulées de mugéarites («aa» et autobrëchifiées) de la fin de la phase IV du Piton des Neiges. Par contre le 2è ensemble, plus récent et plus redressé, correspond au flanc résiduel concave du strato-volcan terminal dont la majeure partie a été démantelée. Il est formé en grande partie de projections et pyroclastites grossières (scories) de nature benmoréitique, correspondant à la phase V du Massif.

Par rapport aux milieux situés en contrebas (1 800-2 500 mètres, ces paysages sommitaux se différencient :

- par une raréfaction de la végétation, qui prend un faciès bas en coussinets blanchâtres,
- par des températures plus basses, des gels réguliers et un ensoleillement supérieur, ce dernier étant dû à l'émergence des sommets de la «mer de nuages».
- par des matériaux superficiels blocailleux (à «sols» rares), marqués par des processus d'ordre périglaciaire.

5.1.1 Le climat

Les températures sont les plus basses de l'île. L'absence d'enregistrement nous oblige à faire des estimations par extrapolations à partir de stations inférieures (Fig. 3.10).

La moyenne annuelle doit être de l'ordre de 7 à 9 ˚ C.

Pendant la période la plus froide (Juillet-Août), la moyenne des minima est de 0 à 2 ˚ C, alors que la moyenne des minima absolus (sous abri) pourrait descendre à -7 ˚ C. Si on considère qu'au niveau du sol, la température est inférieure de 3 à 4 ˚ C par rapport à l'abri, on peut alors supposer qu'elle peut descendre en dessous de -10 ˚ C.

Pour chaque mois de l'année, la température au sol est au moins une fois négative dans la journée. C'est peu avant l'aube (4 à 5 heures du matin) que les températures sont les plus basses.

A l'inverse, durant les mois les plus chauds (janvier-février), la moyenne des maxima absolus (sous abri) est de l'ordre de 20 - 22 ˚ C.

Concernant les pluies, la moyenne ne dépasse pas 1 500 mm au Grand Bénard et probablement pas 2 500 mm au Piton des Neiges. Ces hauts sommets sont relativement peu arrosés par rapport aux versants qu'ils dominent directement. Ceci est en relation avec leur situation au-dessus de la masse nuageuse (photo A.7), qui explique un fort ensoleillement annuel (de l'ordre de 2 500 heures) et une hygrométrie souvent inférieure à 50 % (10 à 20 % en milieu de journée).

5.1.2 La végétation

Sa répartition est conditionnée par les conditions climatiques spécifiques (thermiques, hydriques et d'ensoleillement). Les plantes sont héliophiles, adaptées au froid, et parfois à la sécheresse édaphique.

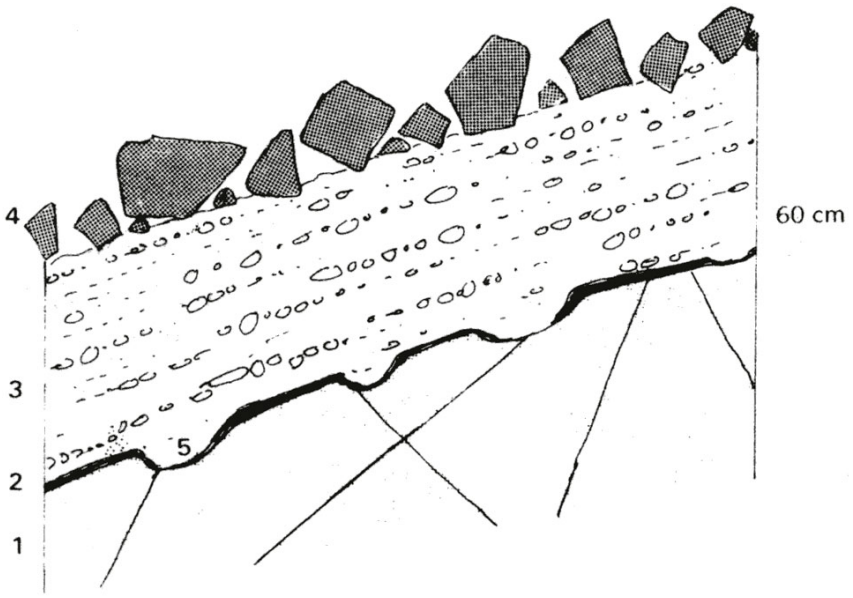
Dans les hauts sommets, la lande éricoïde est très éparse et prend un aspect particulier en touffes et fourrés bas, à port en coussinets globuleux de teinte dominante blanchâtre.

Domine une composée : Stoebe passerinoides (branle blanc) qui peut être associé à de petits buissons de Philica nitida (ambaville), de Senecio huberta (Ambaville blanc), de rares Philippia, ainsi qu'à quelques touffes de graminées (Fesfuca borbonica, Pennisetum caffrum, Panicum lycopodioides).

5.1.3 Les matériaux superficiels et les sols

Les matériaux sont riches en blocailles anguleuses (pierriers du Grand Bénard) ou en scories peu soudées (Piton des Neiges). Les placages de pyroclastites cendreuses pures (en place) sont pratiquement inexistantes. Par contre, au Grand Bénard, sous le pavage dense de surface, à éléments de 5 à 30 cm de large, on observe souvent un matériau jaunâtre meuble de 40 à 100 cm d'épaisseur, composé de cendres et de cailloutis lités (Fig. 5.1). Plutôt que des figures colluviales, une telle structure nous paraît être d'origine périglaciaire, consécutive aux successions gel/dégel (photo A.12). Des températures à cycle journalier alternativement négatives et positives, affectant un matériau cendreux «allophanique» pouvant accepter 200 à 300% d'eau, engendrent des processus de gelifluxion et de reptation sur le versant, aboutissant peu à peu à un pseudo-litage. Cette dynamique est facilitée par la présence sous-jacente d'une coulée en dalle non altérée.

FIG. 5.1 – *Processus périglaciaires dans les couches cendreuses au-dessus de 2500 m d'altitude (Grand Bernard)*



1: Substrat inaltéré
2: Pellicule ferrugineuse
3: Cendres et cailloutis lités (gélifluxion et reptation)
4: Pavage superficiel
5: Cupules pseudo-karstiques de dissolution biochimique

(.jpg)

Le pavage grossier à arêtes vives de surface résulte quant à lui de la gélifraction superficielle des coulées. Soit les blocs éclatés restent sur place, soit ils sont lentement entraînés vers l'aval (tout en restant maintenus en surface) par la lame de gélifluxion alimentée par les placages cendreux et les petits éléments grossiers. Cette dynamique concentre de plus en plus les blocs en surface.

Ces matériaux sub-superficiels meubles (cendres remaniées discontinues ou scories) font office de sols. La très faible couverture végétale est insuffisante pour alimenter un horizon organique et donc initier des processus de lixiviation par acido-complexolyse comme on le voit à plus basse altitude.

5.2 Les planèzes situées entre 1 800 et 2 500 mètres d'altitude (unités 2, 3, et 4)

D'une superficie d'une dizaine de milliers d'hectares, cet ensemble intéresse :

- Au Piton des Neiges
  - dans l'ouest : les «Brulés» de Saint Paul et de Saint Leu (4300 hectares).
  - au Nord : La Roche Ecrite (400 hectares)
  - à l'Est : Le Coteau Kerveguen (1 100 hectares) et le Plateau de l'EntreDeux (200 hectares).
- A la Fournaise
  - le Revers du Rempart des Sables : Plateau Langevin, Plaine des Remparts, Rampes Zézé (2 100 hectares).
  - le Plateau de Foc-Foc (670 hectares)
  - la zone de Bellecombe (1 300 hectares).

Par rapport au secteur précédent, on n'observe plus ici de traces de processus périglaciaires ; d'autre part la lande éricoïde est plus fournie et plus diversifiée, l'ensoleillement est inférieur et les températures moins basses.

En fonction de la nature du matériau superficiel sur lequel se forment les sols, 3 sous-ensembles se dégagent :

- Les zones à tufs soudés en dalle
- Les zones à blocailles et cendres sur coulées.
- Les zones à lapilli et cendres sur coulées

5.2.1 Les milieux à dalle dominante (unité 2)

Il s'agit d'une partie du Brûlé de Saint-Paul et de la Roche Ecrite.

Le substrat correspond ici à une épaisse dalle moulant des versants peu inclinés (pentes inférieures à 20 %), constituée des «tufs soudés» de la phase V du Piton des Neiges (chap. 2). Il s'agit en fait d'une brèche de ramonage à gros xénolithes variés, emballés et soudés dans une matrice cendro-ponceuse le tout étant fortement consolidé en surface sur environ 2 mètres d'épaisseur.

Cette formation, mise en place par une nuée très chaude, a nappé beaucoup plus régulièrement les versants que le fond des coulées superposées les unes aux autres, comme c'est le cas le plus général. En particulier ici, on n'observe ni bossellements, ni rebords, ni chicots, si caractéristiques des coulées imbriquées de types «aa» ou autobréchifié. La surface est lisse mais parcourue d'un large réseau de grandes fissures. Les placages cendreux sont rares, ayant été décapés par le ruissellement ; ce décapage a été favorisé et aggravé par les incendies qui ont dévasté les landes fragiles et «sèches» de cette zone.

Les seuls sites où puisse s'installer la végétation éricoïde sont les nombreuses fissures montrant un tuf ponceux moins soudé en profondeur, et les replats piégeant des matériaux (cendres et graviers) apportés par le ruissellement.

La végétation est donc très irrégulière. De grands espaces lisses à dalle affleurante restent nus (lichens héliophiles seulement). Des fissures émergent des grandes bruyères (Phifippia montana).

Il est intéressant de constater que souvent la dalle, actuellement nue, est imprégnée d'un enduit jaune d'oxydes de fer. Il s'agit d'un placage d'origine illuviale témoignant de la présence antérieure d'une couche de sol sur cendres possédant un «mor» acide sous éricacées. Actuellement la quasi totalité des sols ont été décapés, suite probablement à des incendies depuis le XVIII è siècle sur les hautes planèzes de l'Ouest.

5.2.2 Les milieux à blocailles et cendres sur coulées (unité 3)

Cette unité de milieu, la plus étendue (environ 5 000 hectares), est surtout représentée au Piton des Neiges (Brûlés de Saint Paul et St Leu, Côteau Kerveguen).

Les matériaux sont constitués de coulées affleurantes ou sub-affleurantes, piégeant sur les replats et dans les creux une couche de cendres plus ou moins colluvionnées de 10 à 30 cm d'épaisseur.

- au Piton des Neiges, dans les Hauts de l'Ouest et au sommet de l'EntreDeux, il s'agit essentiellement de coulées autobrêchifiées de la phase IV (mugéarites), alors qu'au Côteau Kerveguen, ce sont des coulées plus récentes de la phase V (benmoreites), également autobrêchifiées pour la plupart.

Les placages et piégeages cendreux ont pour origine la phase V du Piton des Neiges (15 000 - 40 000 ans).

- à la Fournaise, les coulées affleurantes («aa» et beaucoup de «pahoehoe») sont des basaltes de la phase II (Plateau Langevin) et de la phase b (FocFoc). Les cendres (et lapilli associés) ont généralement moins de 10 000 ans.

Le modelé

Le modelé est celui de planèzes à pentes générales modérées (10 à 25 %), ayant conservé la topographie d'épanchements des coulées superposées, sans altération ni dissection notables. Les bossellements, gouttières et bourrelets latéraux, fronts et bordures de coulées, sont bien repérables, spécialement sur les photographies aériennes. Sauf exception, les axes de ruissellement concentré des eaux emprûntent des chenaux d'écoulement des laves qui ne sont pratiquement pas entaillés ; ce creusement n'apparaît vraiment et progressivement, que plus bas, en zone forestière.

La végétation

Le fourré éricoïde d'altitude est ici nettement plus fourni et plus haut que sur les unités précédentes (mais moins cependant que sur les zones à lapilli de l'unité 4).

Les végétaux exploitent la couche cendreuse superficielle résiduelle discontinue ainsi que les multiples fissures, replis et cavités des coulées.

Le peuplement est à base de «branles» Philippia montana (branle vert), Stoebe passerinoides (branle blanc) ; sont présents aussi, en densité variable, les «ambavilles» (Senecio huberta et Phylica nitida), les «fleurs jaunes» (Hypericum lanceolatum), le «velours blanc» (Helichrysum heliotropiforme) ainsi qu'une autre bruyère, Philippia galioides. En plus des fourrés, plus ou moins arbustifs, on trouve des touffes de graminées (Festuca, Agrostis, Pennisetum, Panicum..). Cà et là (surtout en dessous de 2000 mètres) on peut observer de jeunes pousses vert clair de tamarins (Acacia heterophylla), ne dépassant pas 1 mètre de haut.

Enfin, les «brûlés» de Saint Leu et de Saint Paul sont colonisés par des ajoncs introduits (Ulex europeanus).

Dans ces hauts de l'Ouest, en fin de longue saison sèche lors des années particulièrement peu arrosées, les incendies provoqués par l'homme ont fait des ravages dans les fourrés à bruyères, riches en essence et particulièrement desséchées.

Ainsi dans ce secteur occidental la lande s'est progressivement appauvrie (en taille et en couverture du sol), ceci allant bien sûr de pair avec le décapage de la couche cendreuse, la «désertification» progressive et l'évolution vers la rocaille généralisée. Les autres sites, spécialement le Côteau Kerveguen, mieux arrosés, sont plus proches de la végétation climacique naturelle.

Les sols

Sur les matériaux meubles relativement stables (couche de cendres, colluvions cendro-gravillonnaires) où a pu s'installer une végétation éricoïde productrice de litière «acide» on observe souvent le profil suivant :

- en surface, sur une dizaine de centimètres, un «mor» noirâtre à brun foncé, fibreux, de faible densité apparente, exclusivement organique.
- en dessous, sur 5 à 10 cm : un horizon éclairci rosâtre à brun clair, déferrifié.
- puis un niveau brun jaunâtre, à toucher limoneux, humide, de 10 à 30 cm d'épaisseur.
- enfin, un enduit ferrugineux jaune orangé sur le substrat rocheux (photo A.10). Celui-ci ne présente pas de zone d'altération géochimique, mais parfois des «cupules» et petites vasques de corrosion.

Souvent cependant le profil est encore moins différencié et ne montre qu'un horizon humifère sombre, directement posé sur le substrat dur à pellicule jaune d'hydroxydes de fer.

A ces hautes altitudes à températures fraîches, la végétation érico'ide engendre une matière organique acide s'humifiant peu, productrice d'acides fulviques complexant le fer et l'aluminium, le tout sous forme de «chélates» migrant en profondeur. C'est l'origine du niveau jaune d'hydroxydes de fer (niveau «placique») plaqué sur la dalle peu profonde (20 à 40 cm). L'horizon éclairci (lorsqu'il existe) sous l'horizon organique, est un horizon d'illuviation du fer, à pH très acide (4 à 4,5). La pédogenèse est donc ici marquée par des processus «biogéochimique», c'est l'acido-complexolyse (P. QUANTIN). Ces processus sont proches de ceux de la podzolisation.

L'horizon brun-jaune sur cendres (pH 4,5 à 5) a cependant également des caractères d'andosols (toucher onctueux, thixotropie, richesse en imogolite, hydroxydes amorphes de fer et d'alumine). Les cendres vitreuses et finement divisées ont donc subi un processus d'hydrolyse avec départ de silice et de bases et néoformations de produits amorphes, sur lequel se surimpose l'acido-complexolyse.

Si l'on doit classer ces sols on les appellera «andosols» à profil peu différencié, humiques, désaturés, «cryptopodzoliques».

Au contact «sol/dalle rocheuse», surtout quand le sol est peu épais, on observe souvent des figures de dissolution avec corrosion directe de la roche sous la forme de petites vasques et de gouttières séparées parfois par des arêtes. Ce micro-modelé peut prendre l'allure de lapiez pseudokarstique (photo A.11), lorsqu'il est exhumé par érosion du sol préexistant. Ce sont les acides organiques qui sont responsables de cette corrosion.

5.2.3 Milieux à lapilli et cendres sur coulées (unité 4)

Les nappes friables de lapilli basaltiques non soudés (mêlés aux cendres) sont exclusifs du massif de la Fournaise où ils caractérisent (sur 4 000 hectares) la majeure partie des zones de très haute altitude. La route du volcan, entre le Nez de Boeuf et le Rempart de Bellecombe, les traverse.

Comme nous l'avons vu, ces pyroclastites («lapilli jaunes») auraient été émises lors d'au moins deux épisodes explosifs récents datés au C14 autour de 2 000-1 500 ans (P. BACHELERY- 1.981).

Ces lapilli alternés avec des lits cendreux ont 0,5 à 2 cm de large ; ils sont exclusivement vitreux et très finement bulleux (aspect ponceux). Leur couleur est ocre jaune par oxy-hydratation du fer («palagonitisation» suigéneris ou météorique).

L'épaisseur des dépôts est très variable. Elle dépend des lieux et orientations d'émission, des vents et des remaniements superficiels par les eaux. C'est sur le revers de l'Enclos Fouqué que le niveau de lapilli est le plus épais (pouvant atteindre 150 cm) et le plus généralisé. La source principale en serait le Piton du Cirque.

Au nord et à l'est de la Rivière des Remparts, une vaste aire de retombée peut avoir eu pour origine le cratère Commerson. Les dépôts y sont plus discontinus et ne dépassent pas 1 mètre d'épaisseur. Le ruissellement et l'érosion ont été plus actifs dans cette zone (rampes Zézé) du fait des pentes souvent fortes et des multiples petits cônes scoriacés qui ont été saupoudrés par ces lapilli.

Le modelé

Entre le Nez de Boeuf et le Rempart des Sables, le modelé est très irrégulier : après le Nez de Boeuf, et jusqu'aux «rampes Zézé», la topographie peu accidentée (hormis les cônes) est celle du plancher de l'ancienne caldera envahie de laves plus récentes, à une altitude d'environ 2 100 mètres. Les dépôts de lapilli jaunes y sont assez réguliers. Puis à partir des «rampes Zézé» jusqu'à la Plaine des Remparts, les pentes fortes correspondent au flanc de l'édifice-bouclier de la phase 2 de la Fournaise. Les lapilli ont été en grande partie érodés, bien qu'y subsistent encore des lambeaux épais. Enfin, la Plaine des Remparts, jusqu'au rebord de la 2è caldera (Rempart des Sables) montre à nouveau, vers 2300 mètres d'altitude, une topographie générale adoucie. Les coulées «pahoehoe» sont nombreuses entre les cônes de scories. Elles sous-tendent des zones planes ou en cuvettes où s'accumule une petite couché de débris apportés par le ruissellement, temporairement engorgée.

La végétation

Les îlots sub-horizontaux précédents, à drainage médiocre, portent une prairie altimontaine (sans végétation ligneuse arbustive) riche en ubiquistes de ces altitudes (Festuca borbonica, Agrostis salaziensis, Pennisetum caffrum, Panicum lycopodloides, Ischaenum koleostachys), mais aussi des cyperacées plus spécifiques, avec d'une part Costularia melicoides et Carex borbonica en zone restant longtemps humide, d'autre part, Poa borbonica, Helichrysum arnicoides, Huperzia saururus, Carpha sp. en prairie plus «sèche» Les lapilli meubles, en zone bien drainée, sont couverts par une végétation ligneuse semi-arbustive et parfois arbustive, relativement dense, en individus isolés ou en fourrés, où dominent les éricoïdes : les «classiques» Philippia montana, Stoebe passerinoides, Senecio hubertia, Hypericum lanceolatum, Philica nitida, Helichrysum heliotropiforme.

Les «branles» (Philippia et Stoebe) peuvent atteindre, sur lapilli, des tailles (3 à 5 mètres) plus importantes qu'ailleurs. Parmi les fourrés éricoïdes, on observe assez souvent de jeunes plants, de moins de 1 mètre de haut d' Acacia heterophylla. Les graminées sont également présentes en nombreuses touffes et servent de pâturage extensif (moutons et bovins).

Les sols

Sur couche de lapilli suffisamment épaisse et stable pour permettre une bonne colonisation par les éricacées, on peut observer le profil peu différencié suivant :

– un horizon humifère brun-noirâtre (mélanique), de 25 cm d'épaisseur, toujours humide, sablo-gravillonnaire, riche en fines racines, extrêmement friable. La base de cet horizon humifère est irrégulière, de nom-

breuses langues le prolongeant dans les lapilli jaunes sous-jacentes. La matrice fine (environ 30 % de l'ensemble) est tachante et très riche en matière organique, de l'ordre de 60 à 80 % (ce qui correspond à 20 à 35 % de matière organique pour l'ensemble de l'horizon) avec un C/N élevé (15 à 20). Le pH est de 5 à 5,2.

– des lapilli, bruns à l'état humide, jaunâtres à l'état desséché (l'intérieur des éléments grossiers est noirâtre) présentant une structure litée plus ou moins nette (retombées aériennes successives). Au-dessus de certains lits plus cohérents peuvent s'accumuler en liserés oranges, des hydroxydes de fer mobilisés par les acides fulviques (chélates). L'ensemble, toujours humide, est très friable et perméable, les lapilli n'étant jamais soudés.

Au sein des lapilli s'intercalent fréquemment 1 ou 2 lits de cendres de 10 à 30 cm d'épaisseur, de texture limoneuse, très humides et présentant un caractère thixotropique.

Ce niveau de lapilli n'a pas un pH exagérement bas (6 à 6,2), généralement moins acide que sur cendres. De la matière organique est encore présente (5 à 10 %). La capacité d'échange est assez bonne (20 mé/100 g) avec prédominance de calcium. Le complexe absorbant a une saturation moyenne (30 à 50 %).

- la base du profil est souvent rougie par l'accumulation ferrugineuse et un enduit jaune orangé peut imprégner la dalle basaltique sous-jacente. Cet enduit, sur les coulées affleurantes, est alors la trace d'un sol antérieur sur pyroclastites, décapé.

En résumé la faible altération des lapilli (hydrolyse lente), libérant progressivement ses cations, (contrairement à l'évolution beaucoup plus rapide des cendres), nous conduit à classer ces sols parmi les andosols à profils peu différenciés «vitriques». En revanche la végétation éricoïde productrice d'une matière organique abondante générant des acides fulviques qui complexent le fer (et probablement l'aluminium) et migrent en profondeur sous forme de Chélates, nous inciterait à les classer parmi les «andosols peu différenciés humiques cryptopodzoliques». Enfin la présence de niveaux cendreux à nets caractères «andiques désaturés perhydratés» complique encore le problème de la classification de ces sols.

Il nous semble en fin de compte, que le terme «d'andosols vitriques désaturés mélaniques à caractères crypto (ou para) podzoliques» convienne globalement le mieux : en effet le caractère «vitrique», commandé par la présence des lapilli, matériau spécifique à cette unité de milieu, doit être privilégié dans l'énoncé.

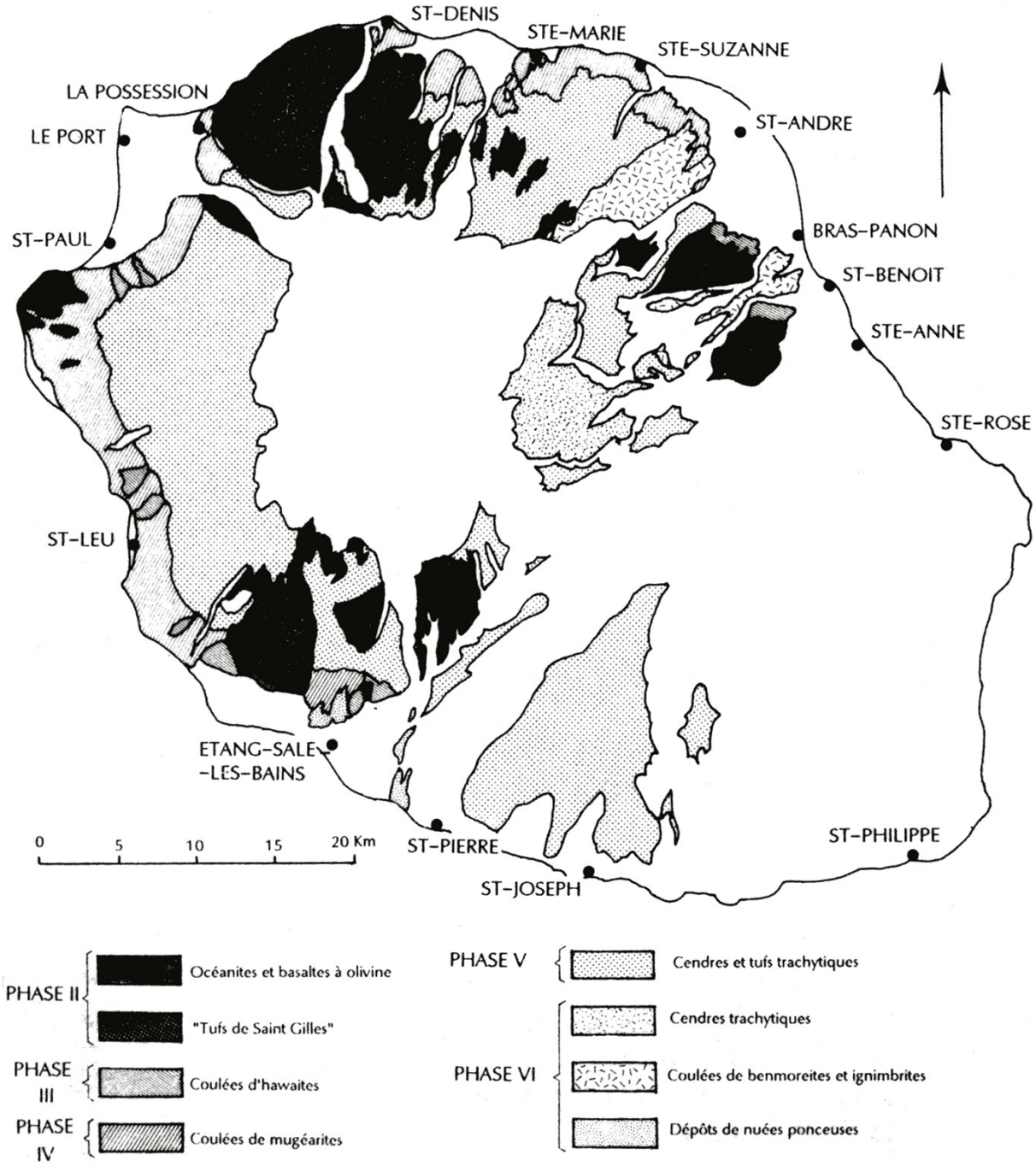
Enfin il nous faut noter la présence de figures pseudo-karstiques de dissolution biochimique des basaltes de la phase 2 (antérieurs à 35 000 ans), en lapiez (photo A.11). Ces processus sont plus accentués sur océanites de la Fournaise que sur mugéarites et benmoréites du Piton des Neiges où nous les avions déjà signalés mais où ils sont plus discrets (unité 3, au Grand Bénard). Très nets sur la Plaine des Remparts, on ne les observe pas encore sur les océanites plus récentes de Bellecombe (phase 5).

Chapitre 6

LES UNITES DE MILIEU SUR MATÉRIAUX VOLCANIQUES EN PLACE DU PITON DES NEIGES (UNITES 5 A 44)

– La subdivision explicative et structurante majeure est d'ordre chronologique et lithologique (Fig. 6.1). Ces deux composantes sont en effet déterminantes pour expliquer, d'une part l'intensité et la nature des altérations, d'autre part le modelé (dissection et morphodynamique). Nous reprendrons donc nos chronologies et répartitions géologiques.
– Le second ordre de caractères déterminants est de nature climatique par l'intermédiaire de l'exposition et de l'altitude.
– La troisième grande composante du milieu sera la forme des versants (et leurs pentes).
– Les caractéristiques strictement pédologiques, qui spécifient également fortement les unités de milieu, n'apparaîtront qu'à la fin, puisqu'elles sont en grande partie conditionnées par les composantes structurantes précédentes.

FIG. 6.1 – *Les Roches mères des sols du Piton des Neiges (Zones effondrées et de très haute altitude exclues)*



(.jpg)

6.1 Les coulées de la phase II (unités 5 à 9)

Les coulées basaltiques de la phase II du Piton des Neiges (Fig. 6.1) affleurent à l'état altéré actuellement sous deux formes :

- soit sous la forme de planèzes terminales, découpées en lanières résiduelles, ayant conservé plus ou moins leur topographie initiale, et n'ayant pas été recouvertes par des coulées ultérieures (Fig. 1.3 et Fig. 2.1). C'est le cas par exemple des parties aval des massifs de la Montagne et du Maniron (Est des Avirons). Ces planèzes supportent alors généralement des sols ferrallitiques. Elles représentent environ 4 000 ha.
- soit, cas le plus fréquent (17 000 ha) sous la forme de reliefs accidentés à pentes très fortes, crêtes et vallées étroites. Ces reliefs façonnent un matériau altéritique épais d'où les vrais sols ferrallitiques (horizon B coloré) ont été en majeure partie décapés. Du point de vue géomorphologique ces reliefs de dissection présentent deux situations distinctes (Fig. 1.3) :
  - en «boutonnières», creusées à travers les coulées des phases plus récentes chapeautant quasiment en concordance les coulées II. Dans ce cas, les reliefs de dissection sont en position topographique inférieure par rapport aux planèzes récentes amont et périphériques disséquées et dont certains lambeaux étroits subsistent en inversion de relief. Il en est ainsi des reliefs situés dans les hauts de Saint-Denis et de Sainte Marie ainsi qu'autour des Makes et du Tevelave.
  - en situation «haute» par rapport aux coulées des phases III, IV ou V, quand ces dernières, au lieu, de napper les basaltes II les ont au contraire contournés. C'est le cas par exemple des massifs de La Montagne, du Maniron, du Bras de la Ravine Goyave et du Dimitile (photo A.42).

Sans revenir en détail sur la description géologique des coulées de la phase II (Chap. 2), rappelons qu'il s'agit de basaltes riches en olivine, constituant l'armature du bouclier primitif du Piton des Neiges, épanchés entre 2 100 000 et 430 000 ans. Les empilements stratoïdes (coulées «aa» dominantes) sont épais et atteignent 800 mètres par endroits. Ces basaltes ont subi une altération sur une grande épaisseur ce qui a favorisé leur dissection, expliquant la faible étendue de leurs planèzes résiduelles.

6.1.1 Les modelés de dissection très accidentés (unité 5)

Mis à part les «remparts» et les reliefs des «cirques», ce type de milieu constitue les zones montagneuses de l'île, également sans intérêt agricole, soit environ 7,2 % de sa superficie totale. Il concerne les régions suivantes :

- le massif de la Montagne
- les massifs des hauts de Saint-Denis (Affouches, Grand-La-Haut, Patates à Durand, Grand Figuier)
- les «massifs-boutonnières» des hauts de Sainte-Marie (massifs de La Confiance, les hauts de Grand Bras Sec)
- le massif de Bras Citron
- le morne du Bras des Lianes
- le massif d'Eden
- le massif du Cratère
- le Dimitile (massif du Zèbre)
- le massif du Bras de la Ravine Goyave
- le massif de la Forêt des Makes
- les massifs du Maniron et du Grand Bras
- le massif de Sans-Soucis

les formes de reliefs

Ce sont de vraies «montagnes», constituées de grands versants escarpés, à pentes généralement supérieures à 40 %, crêtes étroites, vallées encaissées sans remblai alluvial. Les crêtes maîtresses, en longues rides subparallèles, ont la direction du flanc du bouclier primitif (photos A.41, A.42 et A.57). Les crêtes secondaires, courtes, s'y branchent en arêtes de poisson. Parfois, sur ces crêtes, la dissection n'a pas encore effacé la totalité de la surface primitive du volcan - bouclier qui subsiste en longues et étroites lanières jusque dans les parties les plus hautes des massifs. C'est le cas dans les hauts montagneux de Saint-Denis, dans les massifs d'Eden, du Maniron et de Sans-Soucis.

En fait la dissection du vieux bouclier à roches alterées constitue un système morphogénétique (Fig. 1.3) : cette dissection a été la plus intense dans sa partie médiane là où les pentes générales étaient les plus élevées. Les terminaisons aval concaves à pentes modérées ont été relativement épargnées du démantèlement généralisé et peuvent montrer alors des planèzes triangulaires (à pointes vers l'amont) découpées par des ravines profondes vers lesquelles convergent les vallées encaissées du massif montagneux dominant et par où sont évacués les produits d'érosion. Ces planèzes supportent des sols ferrallitiques (unités 6 à 9 page 147). L'amont du volcan bouclier, à tendance convexe et à pentes assez faibles, a été profondement attaqué par l'érosion régressive mais des lanières résiduelles peuvent encore se maintenir.

La végétation

Les vieux massifs, non cultivés, sont occupés par une végétation forestière.

- Jusqu'à 600 mètres d'altitude dans l'est (Bras des Lianes, Eden, Cratère) et 800 mètres ailleurs, la végétation est essentiellement composée d'un taillis forestier secondaire à base de Psidium cattleianum (goyavier) et de Syzygium jambos (jamrosat). Le goyavier, plus héliophile, est souvent dominant sur les hauts de versants, alors que le jam-rosat est plus abondant dans les parties basses.

Dans l'ouest (La Montagne, Sans-Soucis, Grand-Bras, Maniron, Ravine Goyave) s'y mêlent des fourrés à Schinus terebenthifolius (faux poivrier) et Litsea chinensis (avocat marron).

A la Montagne, dans certains sites protégés, subsistent quelques reliques de la végétation forestière mégatherme semi-xérophile d'origine (Chap. 4).

Les sols altéritiques les plus «pauvres» et à sécheresse édaphique (crêtes et sommets à pentes fortes, 1 000 - 1 500 mm de pluviosité) sont riches en grandes bruyères (Philippia) et fougères.

- Au-dessus de cette végétation secondaire, entre 600 et 950 mètres d'altitude, se trouve la forêt mégatherme hygrophile originelle, «à bois de couleur», auxquels se mêlent encore, dans la moitié inférieure, des goyaviers.
- à partir de 950 - 1 000 mètres d'altitude, commence l'étage mésotherme hygrophile, le plus largement représenté et qui s'interrompt à 1 800 mètres lorsque commencent les «fourrés éricoïdes» de haute altitude.

Les sols

La nature des altérations et des sols est déterminée par l'ancienneté du substrat (plus de 430 000 ans), la morphodynamique active chronique (glissements, foirages, arrachements) et l'altitude (commandant les températures et la nature de la végétation).

L'altération hydrolytique (avec lixiviation des cations) a eu le temps de «pourrir» les coulées basaltiques sur une grande épaisseur ; jusqu'à 500 mètres d'altitude, des tranches de 30 mètres d'altération ont été observées

sous les planèzes résiduelles. Les reliefs de dissection sont façonnés dans ces altérites meubles et non dans les basaltes sains ; c'est la raison pour laquelle on n'observe pas au sein de ces reliefs de véritables «ravines» à bords sub-verticaux (comme sur les empilements de coulées saines plus récentes) mais plutôt des vallées profondes en V (fig. 6.3).

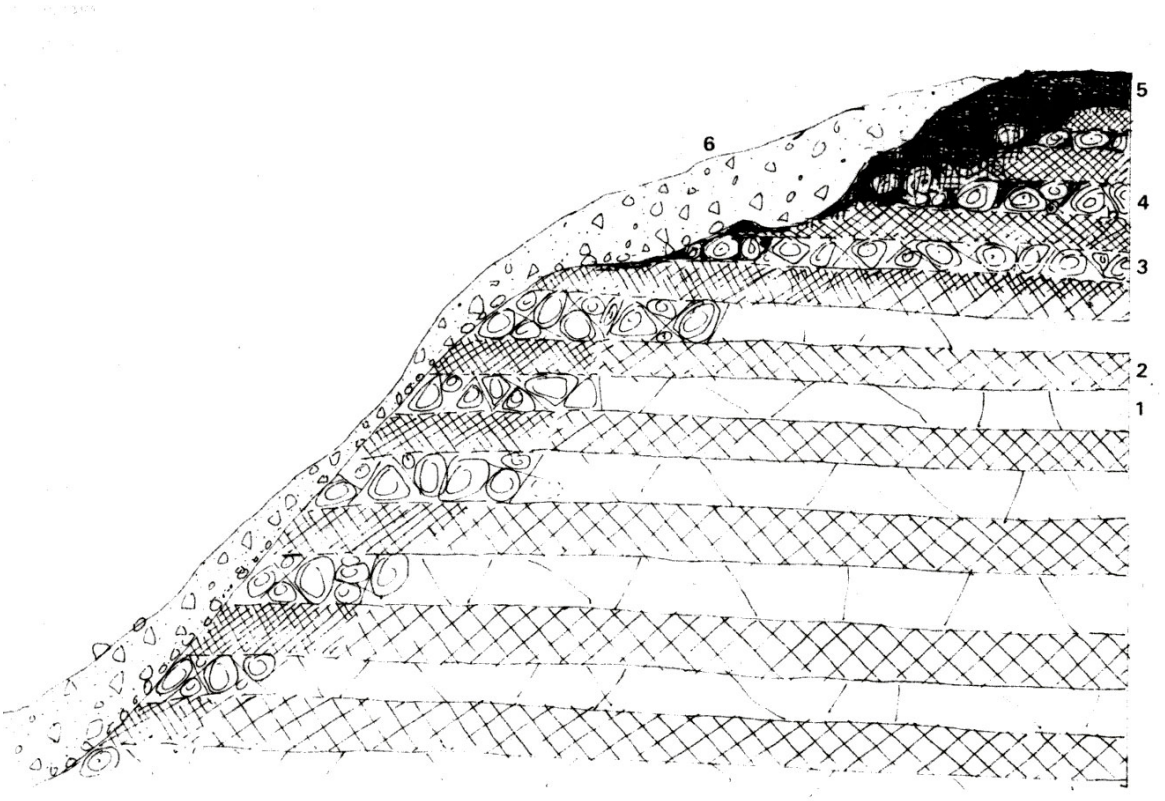
La morphodynamique des versants, par glissements catastrophiques et discontinus, étant plus rapide que l'approfondissement de l'altération, la tranche altérée est moins épaisse que sous les planèzes ferrallitisées voisines ; elle varie entre 5 et 20 mètres, tout en étant plus importante en dessous de 1 000 mètres d'altitude qu'au-dessus où, du fait des températures fraîches, les processus d'hydrolyse sont moins rapides.

Le faciès des altérites n'est pas homogène au sein des coupes et d'un site à un autre. L'altération, qui conserve la structure stratoïde de la formation, a affecté de façon différentielle les couches en «gratons» et les couches massives, dont les épaisseurs sont très variables d'un endroit à un autre.

Les couches massives s'altèrent d'abord le long des fissures de pénétration de l'eau, puis, de façon concentrique, en écailles ou «pelures d'oignon» délimitant des boules sphéroïdales (Fig. 6.2). Les écailles libèrent peu à peu des éléments polyédriques friables de quelques centimètres, de teinte beige ou rosée. Cette structure finit par gagner l'ensemble de la coulée massive. La partie supérieure de la tranche d'altération évolue ensuite par argilification et rubéfaction commençant par les fissures et écailles extérieures les mieux drainées.

Les couches en «gratons», en revanche, présentent un faciès d'altération plus homogène en structure et couleur. Elles libèrent des éléments plus arrondis, caverneux ou alvéolaires, souvent imprégnés de tâches noires manganiques. L'argilification et la rubéfaction, du fait des circulations d'eau préférentielles, se font plus rapidement dans les gratons, qui, au sommet des altérites prennent des couleurs plus vives.

FIG. 6.2 – *Altésites, sols et colluvions suries reliefs de dissection du volcanisme ancien (phase II) à coulées «aa»*



1 : Couche massive saine
2 : Couche scoriacée saine
3 : Couche massive altérée en boules à écailles
4 : Couche scoriacée altérée
5 : Argile rouge (sol ferrallitique)
6 : Colluvions de pente hétérogène (altérites remaniées, caiiloux, matériau cendreux récent)

(.jpg)

Donc en règle générale les altérites présentent des couleurs variées (rouge, gris, violacé, brun, beige) l'aspect d'ensemble pouvant être bariolé. Elles sont généralement exemptes d'éléments grossiers (digérés par l'hydrolyse) ; elles acquièrent une structure polyédrique fine à moyenne anguleuse, générant des talus inclinés ne pouvant se maintenir verticaux (contrairement aux matériaux andiques sur cendres).

L'évolution normale et finale vers le haut de telles altérites est la ferrallitisation, c'est-à-dire l'argilification avec néoformation de kaolinite ou de métahalloysite, individualisation d'oxydes ou hydroxydes de fer, ainsi que d'alumine (gibbsitej. L'ensemble forme un «horizon B» supérieur coloré, rouge si le fer est à l'état d'oxydes, brun s'il est sous forme d'hydroxydes. Une telle évolution est visible actuellement sur les planèzes conservées de la phase II (voir plus loin) ; mais sur les reliefs elle n'a pas le temps de se matérialiser et de se stabiliser. Seules existent les «racines» altéritiques de sols ferrallitiques virtuels car constamment rajeunis (photo A.54). On n'y observe des horizons B colorés que dans les situations très particulières (replats ou crêtes épargnés momentanément par le décapage).

Les sols proprement dits sont alors formés sur des «matériaux de transit» de 20 à 200 cm d'épaisseur (Fig. 6.2), résultant de la dynamique de façonnement des versants : fauchages et décollements gravitaires (reptation, glissements brutaux) des altérites situées en amont et qui, par «à coups» migrent lentement vers les vallées par où elles s'évacuent. Ces matériaux de pente sont donc hétérogènes puisqu'ils peuvent englober tous les faciés et degrés d'altération du basalte ainsi que des éléments grossiers, résidus d'altération non triés ; ils peuvent contenir aussi des dépôts cendreux ultérieurs (et à caractères andiques) entraînés par l'érosion et mélangés aux altérites remaniées. De nombreuses discontinuités de matériaux s'y observent ; elles résultent des foirages successifs ou superposés des altérites et cendres, formant des lentilles de teintes et de consistances variées.

Si l'on doit «classer» ces sols, nous dirons qu'il s'agit de sols peu évolués sur matériaux de pente d'origine altéritique/ferrallitique localement andiques (cendres mélangées).

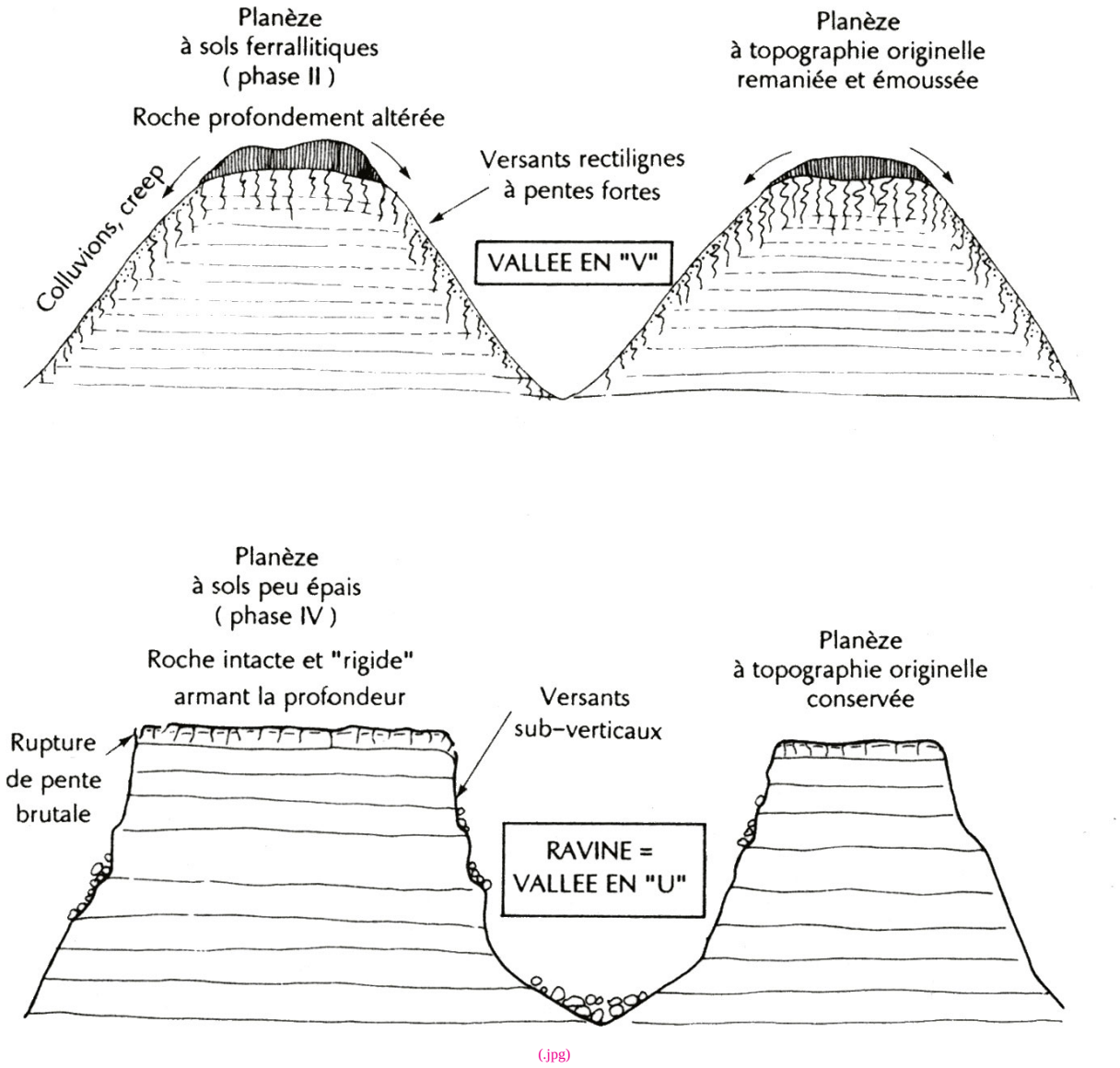
A l'intérieur de ce vaste ensemble, il existe des différences notables en fonction de l'exposition (pluviosité) et de l'altitude (végétation) : les sols ont les teintes plutôt vives (rouge, violacé...) dans les zones à pluviosité actuelle inférieure à 1 500 mm (La Montagne, Sans-Soucis...) correspondant à un état du fer davantage oxydé. Dans les régions plus humides, surtout au-dessus de 500 mètres d'altitude, les teintes brunes ou brun jaunâtre (hydroxydes de fer) prédominent (Eden, Cratère, Dimitile...). La différenciation de l'horizon humifère et le taux de la matière organique suivent à peu près la même logique de distribution : 3 à 4 % de matière organique dans les zones «basses» à moins de 1 500 mm de pluviosité, à 10 % dans les parties plus humides et en altitude.

6.1.2 Les lambeaux de planèzes (unités 6 à 9)

Les témoins des dernières coulées de la phase II non recouvertes de coulées des phases postérieures forment, à l'aval de certains massifs disséqués (Brûlés de Saint Denis et de Saint François, La Montagne, SansSoucis, Maniron-Les Avirons), des planèzes triangulaires allongées à pointes en amont (Fig. 1.3). Ces reliques, représentant 3 300 hectares, ont toutes subi une altération intense avec processus de ferrallitisation arrivés à leur terme. Cependant cette couverture ferrallitique a pu subir des remaniements mécaniques par mouvements de masse et troncatures, ces derniers surtout dans les parties les plus sèches (ouest de La Montagne, Sans-Soucis, Etang-Salé) sur les unités 7 et 9. Les planèzes ferrallitisées des hauts de Saint Denis (Brûlés de Saint-Denis et de Saint-François) et du Maniron (hauts d'Etang-Salé) ont été nappées irrégulièrement de cendres de la phase V. La morphodynamique par reptation et colluvionnements sur de faibles distances, a alors intégré ces cendres andiques à l'horizon B ferrallitique remanié. Ceci est plus net dans les parties amont, plus arrosées, des planèzes là ou justement les sols ferrallitiques (unité 6) ont la couleur des cendres, de sorte qu'il est parfois malaisé de différencier morphologiquement ce qui est ferrallitique sur basalte de ce qui est andique sur cendres. Ce même problème se reposera pour les sols ferrallitiques développés sur les coulées de la phase IV, entre Saint Denis et Sainte Suzanne (unités 30 et 31).

Seuls les sols rouges de basse altitude (unité 7) non excessivement tronqués, mais cependant suffisamment pour que les cendres aient été décapées, ne posent aucun problème d'identification, quant à leur nature typiquement ferrallitique.

FIG. 6.3 – *Profils transversaux comparés des reliefs de dissection. En haut : de planèzes anciennes à substrat non altéré; en bas : de planèzes plus récentes à substrat non altéré.*



(.jpg)

Les sols ferrallitiques bruns (unité 6)

Cette unité de milieu, globalement d'une faible superficie (500 hectares), intéresse les «hautes» planèzes du Brulé de Saint Denis (Mamode Camp) et celle des hauts d'Etang-Salé. Elle en forme les parties les plus pentues (jusqu'à 25 % de pente) et les plus étroites. Les lanières peuvent avoir moins de 200 mètres de large. La limite entre la bordure de la planèze et le versant d'entaille de vallée qu'elle domine, n'est pas aussi tranchée que dans le cas général des planèzes sur coulées plus récentes, qui elles, sont lacérées par de véritables ravines à bords rocheux très escarpés. La dissection dans les basaltes «pourris» sur une grande épaisseur engendre des vallées en V, qui mordent sur les planèzes suivant un angle émoussé par les mouvements de masse régressifs (Fig. 6.3). La topographie des lanières n'est plus le modelé initial des coulées. L'altération argileuse, favorable à la morphodynamique de «fluage/creep» remaniant la partie supérieure, a régularisé la surface en aplanissant les bossellements volcaniques d'origine. Nous verrons plus loin que ce n'est pas le cas pour les coulées plus récentes qui, en général, ont conservé (même en cas de recouvrement cendreux) leur morphologie d'écoulement primitive.

Une telle morphodynamique a eu pour résultat, soit d'éliminer progressivement vers les versants puis les vallées les cendres plaquées postérieurement, soit d'intégrer ces dernières dans la couche de remaniement ferrallitisée. Il semble cependant que le premier cas soit le plus plus général, les caractères «ferrallitiques» étant prédominants sur les caractères «andiques».

Les sols sont à ranger dans les sols ferrallitiques bruns moyennement à fortement désaturés.

Ils sont toujours très épais : l'horizon B argileux (50 % d'argile) peut faire plusieurs mètres d'épaisseur avant qu'apparaisse l'altérite (basalte «pourri», brune à brun-jaunâtre ; la structure est toujours très bien exprimée. La teneur en matière organique en surface (0 - 20 cm) est de l'ordre de 3 à 6 % ; elle chute brusquement en dessous (0,5 à 0,7 %) contrairement au cas des andosols. Le C/N est de 10 à 12 (bonne humification).

Dans l'horizon B, le pH est compris entre 4,5 et 5,5. La capacité d'échange est faible (5 à 7 mé/100 g) et le taux de saturation est faible à moyen (20 à 40 %). Le magnésium domine largement sur le calcium (3 à 6 mé contre 1 à 2), ce qui est en relation avec la nature océanitique (grande richesse en olivine) des laves de la phase II.

Du point de vue minéralogique, il n'y a pas de vraie kaolinite, mais essentiellement de la métahalloysite, de l'halloysite, de la goethite, de la gibbsite et probablement des hydroxydes de fer amorphes. Des poches à cendres résiduelles peuvent contenir des allophanes.

Qualités agronomiques

Les sols ferrallitiques bruns sont des «terres franches» très épaisses, meubles et sans cailloux. Seuls les sols situés à l'est des Avirons (de Ravine Sèche au Maniron) sont actuellement cultivés : canne à sucre surtout, un peu de géranium au-dessus de 600 mètres d'altitude (pointes amont des planèzes). Ceux des hauts de Saint-Denis sont lotis ou sous forêt.

Acides, ils présentent des caractéristiques physico-chimiques médiocres. Le chaulage est nécessaire, ainsi qu'une fertilisation phosphorique et potassique forte et régulière.

Malgré leur forte teneur en argile leurs propriétés physiques sont bonnes ils sont très bien structurés et, en surface, assez bien pourvus en matière organique ; les racines de canne exploitent bien les 50 centimètres supérieurs. La perméabilité est toujours élevée. Ces propriétés en font des sols relativement résistants à l'érosion.

Les planèzes à sols ferrallitiques bruns présentent quelques contraintes d'ordres topographique et géométrique. Les lanières étroites, séparées par de profondes ravines ont des pentes moyennes comprises entre 15 et 25 %. Les replats à pentes inférieures à 15 % sont petits et rares. Beaucoup de parcelles sont difficilement accessibles aux engins agricoles. Ces contraintes de pentes, de dissection, de morcellement et d'accessibilité s'accentuent avec l'altitude. La mécanisation y est donc difficile.

Lors du dessolage et de la replantation, les tracteurs et leurs outils (labour, pulvérisage, sillonnage) sont souvent obligés de travailler dans le sens de la pente. Les risques d'érosion sont alors importants pendant la saison des pluies qui suit. Le «labour chimique» (round-up) peut être une solution dans les situations les plus critiques.

La récolte mécanique est généralement impossible, du moins avec les récolteuses-tronçonneuses actuelles (la remorque ne passe pas). Le CEEMAT (A.3) met au point une coupeuse de cannes entières (le ramassage restant manuel) beaucoup plus autonome et maniable, qui sera utilisable dans ces conditions.

Ces sols ferrallitiques sont aptes à la diversification des cultures : cultures vivrières et maraîchères, arboriculture, tabac, géranium, etc... Mais seule une partie, environ la moitié, pourra être irriguée (Bras de Cilaos) ; ce sont les planèzes situées en dessous de 280/300 mètres d'altitude. Au-dessus, le déficit hydrique annuel sera, en moyenne, suivant l'altitude, de 200 à 100 mm.

Les cultures annuelles devraient toujours être pratiquées avec précautions anti-érosives. Sur les pentes supérieures à 10 %, le travail minimum du sol avec semis direct (voir plus loin) est toujours préférable. Le sol doit être bien couvert de novembre à avril. Si le travail du sol est nécessaire (et s'il est possible) il faut utiliser des engins à dents selon les courbes de niveau, de préférence en avril/mai. La création de cordons végétaux (Pennise-

tum...) tous les 3 mètres de dénivelée, avec fossés d'évacuation de l'eau en amont (pente 1 à 2 %), devrait être systématisée. Si la taille de l'exploitation le permet, la pratique des bandes alternées (cultures annuelles/cultures pérennes absorbantes) est recommandée. Les cultures maraîchères exigeant un affinage du sol, ne devraient occuper que des replats à pente inférieure à 10 %. Les pentes supérieures à 20 % et les rebords de ravines ne devraient être réservées qu'à l'arboriculture (à sol enherbé) aux prairies ou aux boisements.

Les sols ferrallitiques rouges épais (unité 7)

Les sols ferrallitiques rouges sur basaltes anciens occupent les parties aval des vieilles planèzes, au Sud immédiat de Saint-Denis (Le Brûlé, Saint François), à la Montagne et au nord d'Etang-Salé. Globalement ils représentent une superficie de 2 500 hectares.

A la Montagne et à Etang-Salé ces sols sont arrosés par une pluviosité annuelle de 1 200 à 1 500 mm, et à Saint Denis, de 2 000 mm. La saison sèche y est longue (6 mois à moins de 100 mm à Saint Denis, 7 mois à la Montagne, 8 mois à Etang-Salé). Autrement dit ces sols ne paraissent pas en équilibre avec le climat actuel ; ils sont fragiles et sensibles à l'érosion.

Au sud de Saint-Denis, et sur une grande partie des planèzes de la Montagne, les sols rouges sont urbanisés (les glissements de terrain Y sont fréquents). A la Montagne, une partie est cultivée en canne, ainsi qu'à Etang-Salé.

La topographie des planèzes est en pentes douces (moins de 20 %). A Etang-Salé elles sont en continuité, en amont, avec les lanières plus redressées à sols ferrallitiques bruns (unité 6). Comme sur ces dernières, le modelé de détail ne montre plus les irrégularités d'origine des coulées (fronts, bordures, bossellements). La morphodynamique sur ces argiles d'altération a engendré un modelé de larges ondulations. Les plateaux dominent des flancs de vallées modelées en grande partie sur altérites, donc à profil en «V» (glissements en masse) et non en ravines (incision directe de la roche) (Fig. 6.3).

- Altérations et sols

Lorsque la troncature n'est pas excessive, on peut observer la séquence suivante (photo A.54).

Un matériau ferrallitique argileux rougêatre Ce matériau, bien structuré (structure polyédrique moyenne à fine), se débite en petits polyèdres anguleux à l'état sec.

En surface (sur 20 cm d'épaisseur) il est surmonté d'un horizon humifère brun-rougeâtre (5YR 4/4) riche en racines et finement structuré. Cet horizon humifère présente une teneur en matière organique de 3 à 6 % ; sa capacité d'échange est de 14 à 16 mé/100 g, pour un pH de 5. Il est très pauvre en phosphore assimilable-Olsen (12 à 15 ppm).

Sous l'horizon humifère, la teinte devient progressivement franchement rouge (2,5 YR4/6 puis 2,5 YR4/8). La granulométrie est très fine : 60 à 70 d'argile, 15 à 25 % de limons fins, 3 à 7 % de limons grossiers, 5 à 10 % de sables fins, 2 à 6 % de sables grossiers. La densité apparente est de l'ordre de 1. Les réserves en eau sont de 32 à 40 % à pF3 et de 25 à 32 % à pF4,2.

Le pH est toujours voisin de 5. La capacité d'échange est assez faible (6 à 12 mé/100 g). Le complexe adsorbant est fortement à moyennement désaturé (V = 10 à 40 %), ceci en fonction de la pluviométrie. Le rapport Ca/Mg est toujours supérieur à 1. Le taux de potasse échangeable est toujours très faible (0,01 à 0,07 mé/100 g). Le très faible rapport K/Mg laisse supposer une forte carence en potassium. La teneur en phosphore total est inférieure à 500 ppm.

Les minéraux présents dans l'horizon rouge ferrallitique sont essentiellement la métahalloysite, l'hématite et la goethite.

. Un matériau d'altération

L'altérite (sensu stricto) épaisse de 4 à 30 mètres a conservé la structure originelle du substrat stratoïde. Celui-

ci montre des faciès d'altération différents suivant la nature (scoriacée ou massive) de la coulée. Une zone de transition, intermédiaire entre le sol rouge et l'altérite, montre une pénétration irrégulière de l'argilification et de la rubéfaction : le long des fissures de pénétration préférentielle de l'eau dans les laves massives, l'altération hydrolytique isole des boules grises à écailles concentriques, emballées dans une matrice rouge argileuse (plus évoluée), mais à l'intérieur desquelles peuvent subsister des noyaux durs de basalte encore sain. Les laves en gratons (alternées avec les laves massives) s'altèrent plus régulièrement et plus rapidement en argile grisâtre ou violacée, puis rubéfiée par libération des oxydes de fer. L'ensemble peut se déliter en petits polyèdres anguleux à revêtements noirâtres d'oxydes de manganèse. En dessous de la zone intermédiaire, se succèdent des couches stratoïdes de basalte irrégulièrement pourri. C'est dans les hauts de Saint-Denis, zone la plus humide que l'altération est la plus épaisse (15 à 30 mètres). Dans les zones «sèches» (moins de 1 500 mmm de pluviosité actuelle), c'est-à-dire sur les planèzes aval de la Montagne et du Maniron, l'altérite peut se restreindre à moins de 6 mètres. Lorsque l'érosion a fait son oeuvre, éliminant progressivement et préférentiellement les matériaux argilifiés, les grosses boules résiduelles saines peuvent alors joncher la surface. On a alors en aval de l'unité 7, une nouvelle unité de milieu (unité 8), à sols ferrallitiques très irréguliers en épaisseur et caillouteux : Sans-Soucis, Etang-Salé, au-dessus de la falaise littorale à la Montagne.

Dans cette dernière situation, la raréfaction de la végétation naturelle ou son élimination totale du fait de l'emprise des aménagements urbains, accélèrent la déstabilisation de la couverture ferrallitique peu cohérente. Celle ci est de plus en plus la proie du ruissellement et du ravinement régressif à partir de la Falaise du sommet de laquelle dévalent de plus en plus souvent des masses boueuses rouges pouvant entraîner des pans rocheux, menace pour la route du Littoral.

- Qualités agronomiques

Les planèzes à sols rouges de Saint-Denis à la Possession (massif de La Montagne) sont en grande partie urbanisées (NE) ou en broussailles «sèches» (SW). L'agriculture n'y a pas d'avenir : le déficit hydrique est trop important pour les cultures pérennes (canne, arboriculture) et l'irrigation ne pourra pas atteindre ces zones. D'autre part, le décapage ravinant est déjà important. La route du Littoral voit souvent l'arrivée brutale de gros paquets de terre rouge. Nous conseillons donc de boiser toutes ces planèzes en espèces plutôt xérophiles (bois noir, cassi...)

Seuls les sols ferrallitiques rouges d'Etang-Salé-Les-Hauts présentent un potentiel agricole, d'autant plus qu'ils bénéficient de l'irrigation. Actuellement ils sont sous canne. Leur fertilité chimique est faible : pH acide, faible capacité d'échange, très faibles réserves phosphoriques et potassiques. Ils sont encore à ranger parmi les «terres franches». En règle générale, leurs pentes ont moins de 20 % et sont donc inférieures à celles des sols ferrallitiques bruns précédents. D'autre part, les planèzes, plus larges, sont d'un accès plus aisé. La mécanisation de la récolte y sera donc plus facile. Concernant la diversification des cultures, nous renvoyons aux recommandations précédentes. Nous pensons qu'arboriculture et vigne pourraient avoir une place importante dans cette zone. Les cultures vivrières et maraîchères, devraient occuper de préférence les pentes inférieures à 10 %.

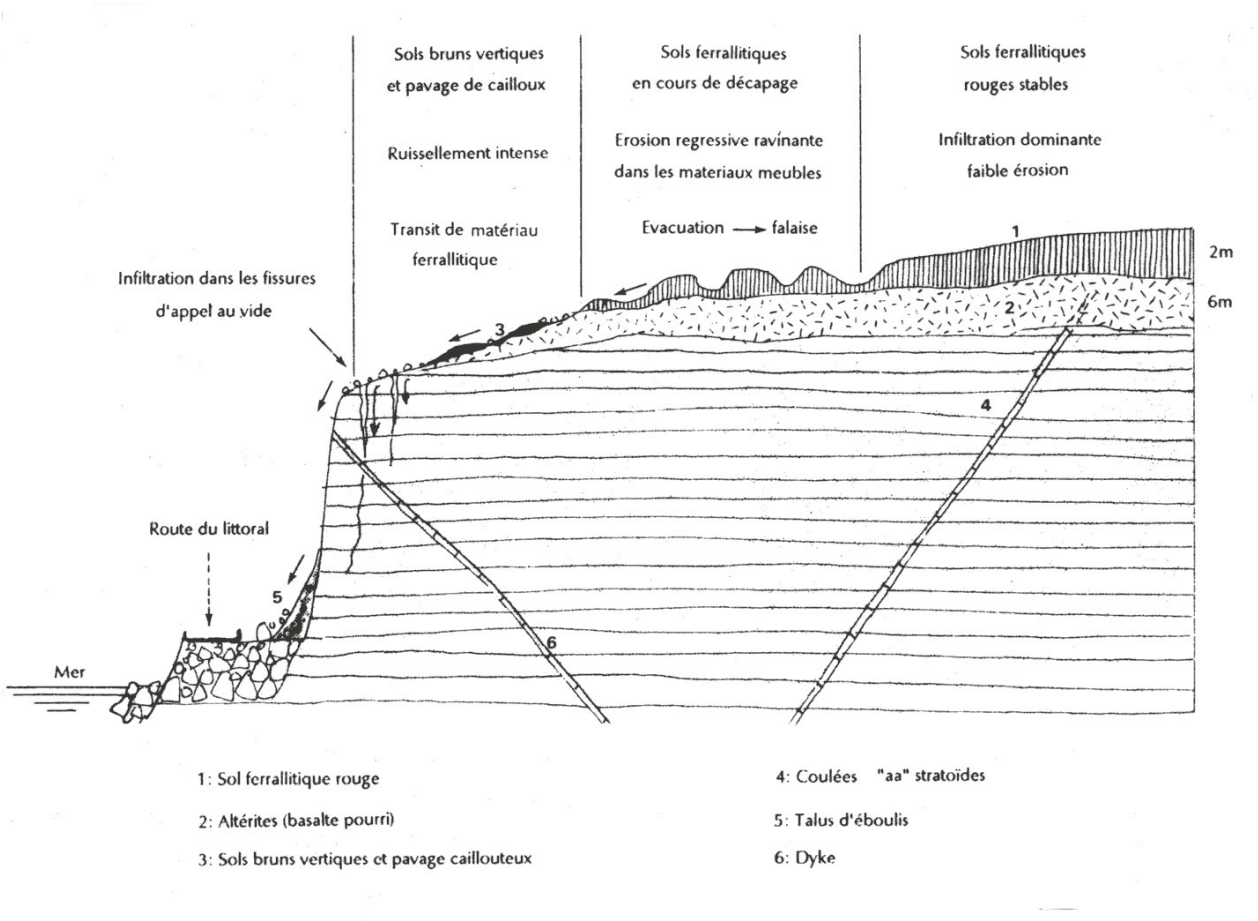
Les sols ferrallitiques rouges à affleurements de résidus d'altération (unité 7)

D'une extension très limitée (150 hectares au total), ce type de milieu diffère du précédent, par la troncature partielle de l'horizon rouge, l'altération moins profonde du basalte, et corrélativement, une mise à l'affleurement des boules basaltiques, correspondant au dégagement des noyaux durs non altérés.

Ces sols ferrallitiques tronqués caractérisent les extrémités des vieilles planèzes de la zone «sèche» : 1 100 à 1 200 mm de pluie, 5 à 6 mois «secs» (moins de 100 mm). On en trouve à Etang-Salé (en bordure nord de la Plaine du Gol), à Sans-Soucis, et, sur une mince bande, au-dessus de la Falaise littorale, entre la Possession et Saint Denis (Fig. 6.4). Ces zones sont généralement peu cultivées.

Les sols ont une épaisseur irrégulière, en poches, variant entre 50 et 150 cm. Leur surface est jonchée de blocs arrondis ou émoussés, d'une taille pouvant atteindre le mètre cube. La teinte est rouge (2,5 YR) en dessous de 50 cm, brun-rougeâtre au-dessus. Leur structure polyédrique anguleuse est toujours fortement exprimée. En

FIG. 6.4 – *Toposéquence et morphodynamique en amont de !a falaise littorale sur basaltes anciens entre Saint Denis et la Possession*



(.jpg)

profondeur se trouve la zone d'altération en boules à «pelures d'oignon», avec argile rouge le long des fissures de circulation d'eau. Le basalte totalement sain commence en moyenne vers 5 mètres de profondeur.

Comparés aux sols de l'unité 7 précécente, les ferrallitiques tronqués des zones sèches présentent des caractéristiques analytiques plus intéressantes : le pH est voisin de 6, le complexe adsorbant, d'une capacité d'échange de l'ordre de 14 mé/1OOg, est moyennement saturé (50 à 75 %). Comme pour tous les sols formés sur basaltes à olivine et océanites de la phase II, le magnésium (7 mé) domine toujours sur le calcium (5 mé).

Ces sols, d'épaisseur très irrégulière et riches en cailloux et boules de grande taille, demandent un épierrage grossier. Sous canne, chaque dessolage (tous les 6 à 12 ans) qui se fait au bull équipé de dents (rippers), extirpe à chaque passage (30/50 cm de profondeur) de nouveaux rochers. Le «rateau» pousse ensuite cailloux et souches en bordure de parcelle. Ne restent alors plus que les éléments inférieurs à 25 cm, qu'il ne sera nécessaire de retirer que si on envisage une récolte mécanisée. Ensuite peut avoir lieu mécaniquement (au tracteur) le sillonnage-plantation ou le sillonnage seul suivi de la plantation manuelle des boutures. Ces opérations sont subventionnées afin d'encourager le renouvellement des plantations dans les zones caillouteuses. Le plus souvent le chantier de dessolageépierrage-plantation, qui a lieu peu avant la saison des pluies, est orienté en descendant la pente, puisque c'est plus pratique et plus rapide pour les chauffeurs, donc aussi moins coûteux.

La parcelle, fortement ameublie, est alors très exposée à l'érosion (de décembre à mars) qui décape un peu plus le sol et fait «pousser» de nouveaux cailloux. Ces pratiques devraient donc être modifiées : travaux en courbes de niveau, réalisation précoce en saison sèche, irrigation. Ainsi le sol sera déjà bien couvert à l'arrivée des pluies.

Sur ces sols, en irrigué, l'alternative à la canne pourrait être l'arboriculture fruitière (dont la vigne). Le maraîchage, les cultures vivrières et le tabac (avec les précautions mentionnées) ne devraient être envisagés que sur des pentes inférieures à 10 %.

Les sols bruns vertiques sur alterites tronquées (unité 9)

Cette unité de milieu n'a été observée que sur les vieilles planèzes terminales «rapées» du massif de la Montagne situées au-dessus de la Possession et au nord de la Ravine à Malheur, sur environ 200 hectares. Les sols ferrallitiques ont été ici totalement décapés ; la zone d'altération elle même a été suffisamment tronquée pour libérer encore des éléments minéraux (silice et magnésium) pouvant donner naissance à une pédogenèse nouvelle à formation de smectites, en accord avec les conditions morpho-climatiques actuelles : pentes faibles, inférieures à 12 en dessous de 250 mètres d'altitude, pluviosité de 900 à 1 100 mm, très longue saison sèche avec 6 mois à moins de 50 mm de pluie. La géochimie de ces aRérites sur océanites est donc intéressante. Elle a été étudiée par C. GENSE (1976).

Entre les noyaux résiduels de basalte sain, dont les blocs jonchent la surface, les altérites ont des couleurs bigarrées, dans les rouges, verdâtres et grisâtres. Les matériaux gris verdâtre sont composés d'argiles montmorillonitiques ferro-magnésiennes, les zones rouges contiennent des métahalloysites. Les fissures des altérations gris verdâtre à smectites contiennent également des concrétions magnésiennes sous la forme de rognons allongés de 5 à 10 cm et de veinules. La source de magnésium est la quantité importante d'olivine contenue dans les océanites.

Des concrétions siliceuses (opale) ont également été observées en petites couches dures, de quelques millimètres à quelques centimètres, subparallèles à la surface topographique, vers 1 mètre de profondeur.

Toutes ces concrétions, ne sont pas d'origine hydrothermale mais géochimique altéritique, sous un climat sec et chaud peu lessivant, favorables à la libération de silice et de magnésium à partir des océanites et à la néogenèse de montmorillonite.

Dans la partie supérieure du profil d'altération s'observe un sol vertique ou brun-vertique, de 20 à 50 cm d'épaisseur, très argileux, de couleur brun foncé, riche en cailloux et blocs.

Le pH est de 7 à 8, la capacité d'échange et la saturation sont élevées avec prédominance de magnésium sur le complexe absorbant. Entre la Ravine à Malheur (600 mètres d'altitude) et la Falaise de la Possession, la toposéquence d'unités de milieu se présente comme indiqué sur la figure 6.4.

Ces zones présentent un faible intérêt agricole. Les sols argileux, peu profonds et caillouteux, occupent une situation très sèche qui est inaccessible à l'irrigation. Leur très faible perméabilité induit un fort ruissellement qui aboutit à la falaise littorale en aval de Ravine à Malheur. La meilleure utilisation que l'on puisse faire de ces zones est le reboisement en espèces semi-xérophiles adaptées aux sols vertiques : Ziziphus, Prosopis, Acacia, Pithecellobium dulce (Tamarins de l'Inde)...

6.2 Les Tufs de Saint-Gilles (phase II) (unités 10 à 12)

Bien que de faible étendue (850 hectares), le massif des «tufs» de Saint-Gilles forme un ensemble à part, au sein du volcanisme ancien, de par son mode de mise en place et la nature des laves qui le constituent. Il est à rattacher aux formations terminales de la phase II. Comme nous l'avons vu précédemment (Chap I), il s'agit de tufs et brèches hétérogènes, plus ou moins fortement soudés, mis en place lors d'éruptions explosives fissurales (rift N120) phréato-magmatiques.

L'ensemble forme des reliefs de hautes collines à croupes arrondies et à vallées évasées, orientées NW-SE, entre le Cap La Houssaye et SaintGilles-Les-Bains. La route du littoral passe au pied des falaises qui permettent de bien voir la structure interne et les facies lithologiques du massif.

Les versants et les convexités sommitales sont couverts d'une savane herbeuse «sèche» à Heteropogon contortus qui jaunit précocement en début de saison sèche et qui est ensuite balayée par les feux de brousse, conférant à cet ensemble un aspect particulièrement aride.

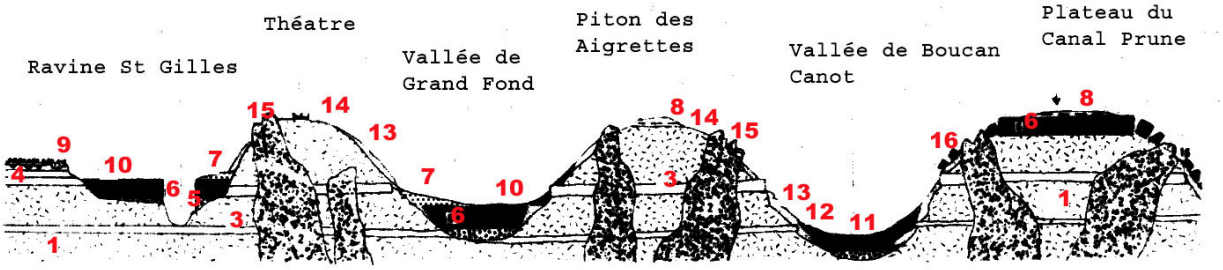
Seuls les versants de la ride de Grand-Fond, en contrebas du Piton des Aigrettes, montrent un aspect plus riant, grâce à ses vergers irrigués, bénéficiant d'arrivées d'eau à partir de canaux branchés dans la Ravine Saint-Gilles.

La région est la moins arrosée de l'île, puisque la pluviosité serait de l'ordre de 550 mm sur le littoral (Pointe des Aigrettes/ Cap la Houssaye) et de 700 mm à 200 mètres d'altitude, limite Ouest d'affleurement du massif, enfoui ensuite sous des coulées plus récentes. La saison sèche est très longue, avec 7 à 7 mois «secs» (moins de 50 mm par mois).

6.2.1 Relations géomorphologiques avec les autres types de formations

A l'est, sous l'Eperon,les «tufs de Saint-Gilles» disparaissent sous les coulées des phase III et IV. Actuellement, le contact géologique «phase II des tufs de Saint Gilles/phase IV effusive», est bien visible en contrebas immédiat du village de l'Eperon, où il est matérialisé par des petits escarpements à dalles disloquées ; ces ressauts correspondent, soit aux fronts des coulées d'origine stoppées par les massifs des «tufs de Saint-Gilles» avant leur érosion aboutissant à l'état actuel, soit au recul ultérieur de ces fronts, du fait de leur érosion régressive propre. En fait, les deux processus ont dû avoir lieu, l'érosion des «tufs» ayant favorisé celui des fronts de coulées, apparaissant maintenant en position haute relative, par inversion de relief (Fig. 6.5).

FIG. 6.5 – *Coupe morpho pédologique schématique nord-sud dans le massif des «tufs de Saint-Gilles»*



1 / Brèche pyroclastique phréato-magmatique de nature basaltique, de teinte générale claire (phase II)
2/ Injection, laviques basaltiques autobréchifiées, de teinte sombre (phase II).
3/ Coulées d'océanites (tendance "phaoehoe") interstratifiés, de 5 à 10m d'épaisseur (phase II).
4/ Coulées de basalte à microlithes feldspatiques, à tendance"pahoehoe" (fin de phase II).
5/ Colluvio-alluvions enterrées par des Coulées de vallée.
6/ coulées de vallée, souvent en inversion de relief : mugéarites gris-clair en coulées "aa" (phaseIV).
7/ Tufs ponceux peu soudés noiràtres (phase V).
8/ Tufs ponceux soudés trachytiques de teinte claire ("Tufs jauné")(phase V).
9/ sols fersillitiques ou ferrallitiques fortement tronqués rougeâtre, à pavage caillouteux.
10/ Vertisols et affleurements rocheux.
11/ Vertisols à nodules calcaires sur Colluvio-alluvions,
12/ Sols bruns vertiques sur colluvions de pente.
13/ Sols bruns sur colluvions de pente.
14/ Sols bruns peu épais
15/ Affleurements rocheux
16/ chaos de blocs d'éboulis

(.jpg)

A l'heure actuelle, les massifs arrondis formant les «tufs de Saint-Gilles», émergent au-dessus des laves périphériques qui les ont évités (photo A.22). Ces coulées ont contourné les reliefs, en envahissant les vallées et gouttières existant à l'époque. Ainsi, de part et d'autre de la Ravine SaintGilles, en aval du bassin des Cormorans se trouvent de magnifiques «planèzes perchées», anciennes coulées de vallée, réentaillées postérieurement et profondément par la Ravine actuelle. Les lignes de reliefs épargnés par ce volcanisme effusif dominent l'ensemble (le site du théâtre en plein air par exemple). De tels systèmes «ravine-planèzes étagées en bandes plus ou moins larges - dômes de tufs dominants» se retrouvent le long de plusieurs gouttières de ce type rejoignant la mer, entre le Cap La Houssaye et Saint Gilles-les-Bains : Ravine Fleurimont, Ravine Boucan-Canot, Ravine Grand Fond.

A l'occasion des ravines actuelles, par exemple dans la Ravine Saint-Gilles, on constate que le contact «coulée/tufs de Saint Gilles» est souligné dans la partie supérieure de ces derniers par une zone rougie due à la cuisson.

La phase explosive du Piton des Neiges (Phase V) a saupoudré irrégulièrement les massifs, de projections litées ocre jaune (vrais tufs) associées et précédées par des graviers et sables noirâtre. Ces projections sont conservées sur les replats et dans les creux, où elles ont été, moins qu'ailleurs, éliminées par le décapage postérieur. Ces placages pyroclastiques ont saupoudré indifféremment les «formations de Saint Gilles» et les basaltes effusifs plus récents. L'érosion a été plus active sur les formations de Saint-Gilles, de sorte que les sites à recouvrement de tufs lités y sont assez rares. En fait on ne les observe vraiment bien que dans la tranchée située de part et d'autre de la route reliant Grand-Fond à SaintGilles les Hauts, sur un dôme aplati, au lieu-dit «les Trois Roches». Elles ont alors 1 à 2 mètres d'épaisseur et montrent une très belle litation d'éléments ponceux de teinte beige au-dessus de graviers pyroclastiques noirâtre de la même phase V, mais légérement antérieurs. Cet ensemble est bien postérieur aux «tufs de Saint-Gilles» et en est indépendant puisqu'on les trouve également en placages sur des basaltes environnants de la phase IV. Quant aux «sables et graviers noirs», souvent exploités pour la maçonnerie, si on les trouve parfois associés aux tufs lités beiges mais en position inférieure, on les voit aussi et c'est le cas le plus fréquent, seuls. Il semble y avoir eu, pendant les projections aériennes, une redistribution des fragments en fonction de leur poids et de leur taille. La partie sud de la gouttière de Grand-fond, enserrée par des massifs de tufs de Saint-Gilles, est en partie comblée par ces pyroclastites noirâtres. On en trouve aussi à Saint Gilles les-Bains, plaqués en contrebas du théâtre en plein air sur la rive droite de la ravine (Fig. 6.5).

6.2.2 Les croupes et versants pentus (unité 10)

Ce sont les parties hautes des reliefs proprement dits, qui émergent au dessus des laves périphériques plus récentes (phase IV) ; leur superficie est de 550 hectares. Sur la carte à l'échelle du 1/50 000 cet ensemble n'a pas été subdivisé. En réalité, il est constitué de quatre sous-ensembles, qui ont été cartographiés à l'occasion de l'étude de détail (1/10 000) réalisée par ailleurs sur le versant ouest de l'île (RAUNET, 1989) .

Les croupes sommitales

Les sommets de dômes convexes relativement larges (100 à 300 mètres) ont des pentes n'excédant jamais 15 %. Leur altitude est comprise entre 150 et 225 mètres. Les plus marqués sont le Piton des Aigrettes, le Piton Cormoran, les croupes situées en rive gauche de la «ravine» Fleurimont, la ride du Théatre en Plein Air de Saint Gilles-Les-Bains, et la ride de Moulin Kader.

La végétation, exclusivement herbacée, est composée d'Heteropogon contortus se desséchant vite, à nombreux espaces nus ; en saison sèche ce sont ces zones qui brûlent les premières.

Les sols sont peu épais (épaisseur inférieure à 40 cm, la plupart du temps de l'ordre de 15/20 cm). Ce sont des sols bruns eutrophes ou des sols peu évolués d'érosion : ils se limitent à une couche superficielle (10 à 40 cm) de teinte brun-foncé (10 YR 3/2, en humide), toujours bien structurée (structure grenue à polyédrique fine), à enracinement graminéen dense. La proportion de blocs est peu importante, sauf lorsque affleurent de gros amas basaltiques autobréchifiés injectés dans les tufs. Les éléments grossiers emballés dans la matrice terreuse

peuvent être nombreux mais de taille généralement inférieure à 20 cm.

Le sol proprement dit repose sur le substratum tuffeux ou bréchique de teinte jaunâtre à beige, compact, difficilement pénétrable par les racines ; malgré leur faible épaisseur ces sols bruns embryonnaires ont de bonnes propriétés physico-chimiques.

- Contraintes, avantages et aptitudes

Les pentes modérées sont favorables à la culture mécanisée ; un autre facteur favorable est la faible teneur en blocailles, exceptées quelques zones localisées à affleurements de basalte.

Par contre les contraintes sont les suivantes :

– faible épaisseur des sols,
– forte compacité du substratum malgré la relative friabilité du tuf,
– accessibilité difficile à la mécanisation et à l'irrigation.

Les flancs pentus sans éboulis

Cet ensemble morpho-pédologique représente la partie la plus importante des massifs des tufs de Saint-Gilles. Ceux-ci présentent généralement un «profil transversal» convexo-concave, le point d'inflexion étant tangent à la ligne de la plus grande pente du versant. Un tel profil résulte d'une érosion «normale» d'un matériau relativement «isotrope», contrairement à l'évolution des versants sur coulées stratifiées. Un tel façonnement convexo-concave ne s'observe à la Réunion que dans cette région. Il est localement pertubé par la présence (disposée au hasard semble-t-il) des injections de basalte autobréchifié qui reste localement en relief. La pente générale moyenne est comprise entre 25 % et 45 %. les versants pentus sont généralement réguliers, sans ravinements ni gros chaos et pignons rocheux. La végétation est une savane herbeuse stricte (sans arbres), brûlant tous les ans, à dominance d' Heteropogon contortus, Bothriochloa pertusa, Aristida depressa.

Les sols sont développés sur des matériaux colluviaux en transit lent vers l'aval et issus de l'érosion des parties sommitales rabotées. Ce sont des sols bruns eutrophes relativement épais (40 à 60 cm d'épaisseur) et modérément caillouteux,sauf là où se trouvent de gros blocs de basalte déchaussés et basculés sur la pente avant d'être englobés dans la tranche colluviale. Les sols montrent donc le profil moyen suivant :

– en surface, sur 15 cm : couleur noirâtre à brun très foncé (10 YR 3/2 en humide); la structure est grenue et très développée, grâce à un enracinement graminéen très dense. La proportion de cailloux et cailloutis est de l'ordre de 20 %. La texture de la matrice terreuse est argileuse à argilo-limoneuse.
– de 15 à 40 cm de profondeur: couleur brun foncé (7,5 YR 3/2 en humide) ; la structure est polyédrique fine anguleuse très développée. Les racines de graminées sont nombreuses ; il y a environ 30 % de cailloutis.

Ces deux horizons constituent la couche colluviale. La limite inférieure de celle-ci est nette mais festonnée.

– de 40 à 70 cm de profondeur, se trouve un horizon d'altération en place du tuf. L'altération y est irrégulière : les poches argilifiées (brun foncé), stucturées et exploitées par les racines, sont associées au tuf massif grisâtre.
– en dessous de 70 cm, se trouve le substrat tuffeux grisâtre à jaunâtre (5YR 4/2) englobant des éléments basaltiques anguleux de 2 à 30 cm de large ; il est massif et non pénétré par les racines.

Ces sols, bien qu'assez peu épais, ont de bonnes qualités physicochimiques et une pierrosité encore acceptable ; du fait de leurs pentes excessives ils présentent cependant de fortes contraintes d'exploitation dans l'optique d'une mécanisation.

Sauf exception actuelle (Grand Fond), la faible épaisseur des sols interdit la réalisation de banquettes de cultures qui mettrait à nu le substratum tuffeux inexploitable. Ces zones sont donc inaptes à l'irrigation. On ne peut que conseiller de les couvrir de boisements (Leucaena, Albizia lebbeck).

Les flancs pentus à éboulis de blocs

Cette unité de milieu diffère de l'unité précédente par la présence sur les versants, d'amoncellements de gros blocs (souvent plusieurs mètres cubes). Ceux-ci proviennent du démantèlement du «chapeau» de coulées (phase IV) qui coiffe localememnt les «tufs de Saint-Gilles». Le recul par érosion régressive de ces fronts de coulées a provoqué la dislocation de la dalle sommitale en blocs chaotiques de toutes tailles jonchant les grands versants. Cette unité de milieu a été identifiée essentiellement sur les rives gauches des ravines de Fleurimont et de Boucan-Canot.

Ces versants, à profil généralement rectiligne (et non à tendance convexe comme dans le cas précédent), ont des pentes supérieures à 25 %. Leur intérêt agricole est nul. L'abondance et la taille des blocs sont telles que l'épierrage n'y est pas envisageable. D'autre part la pente est généralement excessive.

Les affleurements et chicots rocheux

Les roches affleurantes (brèche basaltique très soudée) au ras du sol ou bien proéminentes (pignons), peuvent être présentes un peu partout dans les unités décrites précédemment. Nous n'avons pu les recenser et les indiquer sur la carte au 1/50 000.

Ils se répartissent de préférence à la limite «dôme convexe peu pentu - versant très pentu» (Fig. 6.5). Il soulignent alors les ruptures de pentes (qui sinon sont peu marquées). Ces affleurements ont fréquemment un aspect ruiniforme déchiqueté, forme qui résulte de la nature bréchique soudée (autobréchifiée) non orientée du basalte et de sa résistance plus grande à l'érosion que celle des tufs encaissants où il s'est injecté à la verticale.

6.2.3 Les bas de versants (unité 11)

En continuité aval avec les unités précédentes, nous sommes ici dans les parties légèrement concaves des versants sur «tufs de Saint-Gilles», dont les pentes sont comprises entre 10 % et 25 %. D'autre part, les sols y étant plus épais, l'unité devient plus intéressante du point de vue utilisation agricole. Elle constitue une bande de 30 à 150 mètres de large, mais est parfois quasiment inexistante.

Les sols sont des sols bruns «vertiques». Ils sont relativement épais (50 à 100 cm) et sont développés sur colluvions de pentes. Celles-ci proviennent du décapage des parties sommitales, qui après «transits» sur les versants pentus, s'accumulent dans les gouttières et vallons, après avoir «épaissi» les bas de versants. Les colluvions sont donc formées de matériaux mixtes (tuffeux, terreux et caillouteux).

Les sols montrent un horizon de surface brun-noirâtre (10 YR 3/2 en humide) assez épais (20 à 30 cm) à structure grenue ou polyédrique fine, à fort enracinement graminéen ; la proportion de cailloux y est de l'ordre de 20 %. En dessous, on passe à un horizon brun foncé (10 YR 3/3 en humide) plus largement structuré, de 20 à 50 cm d'épaisseur. On y observe encore de nombreuses racines de graminées. A la base de cet horizon on remarque quelquefois des «faces de friction» luisantes («slicken sides») indiquant la présence d'une certaine quantité d'argiles gonflantes. En profondeur on arrive sur le tuf en place, de teinte brun-jaunâtre à grise, généralement compact, non fissuré et donc difficile à exploiter par les racines.

A l'état naturel, les bas de versants sont occupés par une savane herbeuse sans arbres, à base d'Heteropogon contortus, Themeda quadrivalvis,Tephrosia purpurea et, dans les sites les plus propices à la réception du ruissellement, Panicum maximum. Ces trois dernières espèces caractérisent dans l'ouest réunionnais des conditions édaphiques et hydriques plus favorables.

Certaines de ces zones ont déjà été aménagées et sont irriguées (photo A.22). Il en est ainsi des pourtours des «gouttières» de Boucan-Canot et de Grand-Fond en contrebas du Canal Prune et du Canal Jacques par lesquels les terres sont irriguées. Ces canaux serpentent sur les versants des «tufs de Saint-Gilles» à 145 mètres d'altitude, et sont alimentés par le Bassin Malheur et le Bassin des Aigrettes, dans la Ravine Saint-GilleS.A ces endroits, priviligiés par les arrivées d'eau, les versants ont été aménagés en pseudo-terrasses et bordés de bourrelets ; y sont pratiquées cultures maraîchères et arboriculture.

Ces bas de versants conviennent donc à l'agriculture irriguée, à condition que l'arrivée d'eau y soit économiquement possible, ce qui n'est certainement pas le cas partout, compte tenu de la présence des reliefs accidentés dominants et de l'étroitesse des bandes colluviales de piémont. L'irrigation localisée est la plus approppriée, les sols contenant une certaine proportion d'argiles gonflantes qui les rend assez peu perméables.

Les sols à tendance vertique interdisent certains arbres fruitiers tels les agrumes et les avocatiers.

La mécanisation sera toujours délicate en raison des pentes relativement fortes (10 à 25 %). L'aménagement en vraies terrasses n'est pas recommandé sous peine de racler les tufs non altérés quasiment stériles.

6.2.4 Les gouttières colluviales (unité 12)

Ce type de modelé résulte de la dissection des «tufs de Saint-Gilles». Celle-ci ne conduit pas à la formation de «ravines» encaissées à bords abrupts, comme c'est le cas sur coulées, mais à la genèse de vallons et gouttières concaves, souvent évasées en amont (300 mètres) ; Les gouttières sont en continuité latérale avec les bas de versants concaves (unité 11 précédente) elles ne sont pas drainées par un cours d'eau marqué, mais souvent par une simple entaille sinueuse et peu profonde. Les pentes longitudinales sont de l'ordre de 2 à 5 %.

Les matériaux superficiels sont constitués de colluvions et colluvio-alluvions de 1 à 3 mètres d'épaisseur, issues du décapage des versants dominants.

Les sols développés sur ces matériaux sont des «vertisols grumosoliques topo-lithomorphes», ce qui signifie : vertisols à structure superficielle fine et dont la genèse d'argiles gonflantes (montmorillonite) est favorisée par deux conditions favorables : d'une part une topographie en creux à pentes relativement faibles favorisant un fort contraste des conditions hydriques (engorgement et confinage en hivernage, forte et longue dessiccation en saison sèche), d'autre part une lithologie riche en minéraux calco-alcalins, à l'origine d'un «bain basique» assuré par la solution du sol, condition géochimique nécessaire à ce type de pédogenèse.

Les vertisols de cette unité, comparés à ceux qui sont développés directement sur coulées (voir plus loin, unité 25) sont relativement épais (50 à 120 cm) et donc plus intéressants. Ils montrent les caractères suivants

En surface, sur 15 à 25 cm la couleur est gris foncé à noirâtre (2,5 Y N/2, en humide) ; la structure est finement polyédrique à grenue, l'enracinement est toujours élevé (graminées à l'état naturel). Les cailloux peuvent être assez abondants mais il ne sont jamais très gros. En dessous on passe à l'argile «vertique», de teinte encore sombre (2,5 Y 4/4, en humide, brun olive) ; la teneur en argile est très élevée (aux alentours de 75 %) ; la structure, à l'état sec, est très développée, montrant de gros agrégats et des prismes séparés par de larges fissures (jusqu'à 2 cm) ; à l'état «frais», on observe de larges «places de friction», striées et luisantes recoupant obliquement les prismes structuraux. Ces caractères, typiques des vertisols, témoignent de la dynamique interne des argiles gonflantes (alternances gonflement-retrait).

- Aptitudes

Ces sols ont une épaisseur correcte et leur, pierrosité est peu encombrante. D'autre part ils ne sont pas associés à des affleurements de dalles, comme c'est le cas assez général pour la deuxième catégorie de vertisols développés directement sur coulées (unité 25). Leur principale contrainte provient de leur nature vertique : à l'état gonflé, ces sols sont totalement imperméalables ; ils nécessitent un réseau de colatures destiné à évacuer l'eau en excès. Il demandent une irrigation bien ajustée à faible débit. L'irrigation localisée est la plus appropriée.

Ces sols conviennent bien aux cultures fourragères herbacées ainsi qu'à la canne à sucre. L'arboriculture fruitière y est moins adaptée, en tout cas pour les espèces sensibles à l'hydromorphie telles par exemple les agrumes et l'anacardier. Le maraîchage y est difficile en tout cas pour les plantes à bulbes, racines et tubercules.

6.3 Les coulées de la phase III (unités 13 à 16)

Les coulées de la phase III, étalées sur environ 100 000 ans, sont datées entre 350 000 et 250 000 ans. Ce sont essentiellement des «hawaïtes» (proches des anciennes «andésites» labradoriques), déjà plus riches en silice, en aluminium et en alcalins, et surtout nettement plus pauvres en magnésium (5% MgO) que les océanites et basaltes à olivine de la phase II précédente (10 à 20 % MgO). Le faciès des hawaïtes réunionnaises est le plus souvent porphyroïde, à grands cristaux blancs de feldspath ; c'est la «roche pintade» très aisément identifiable.

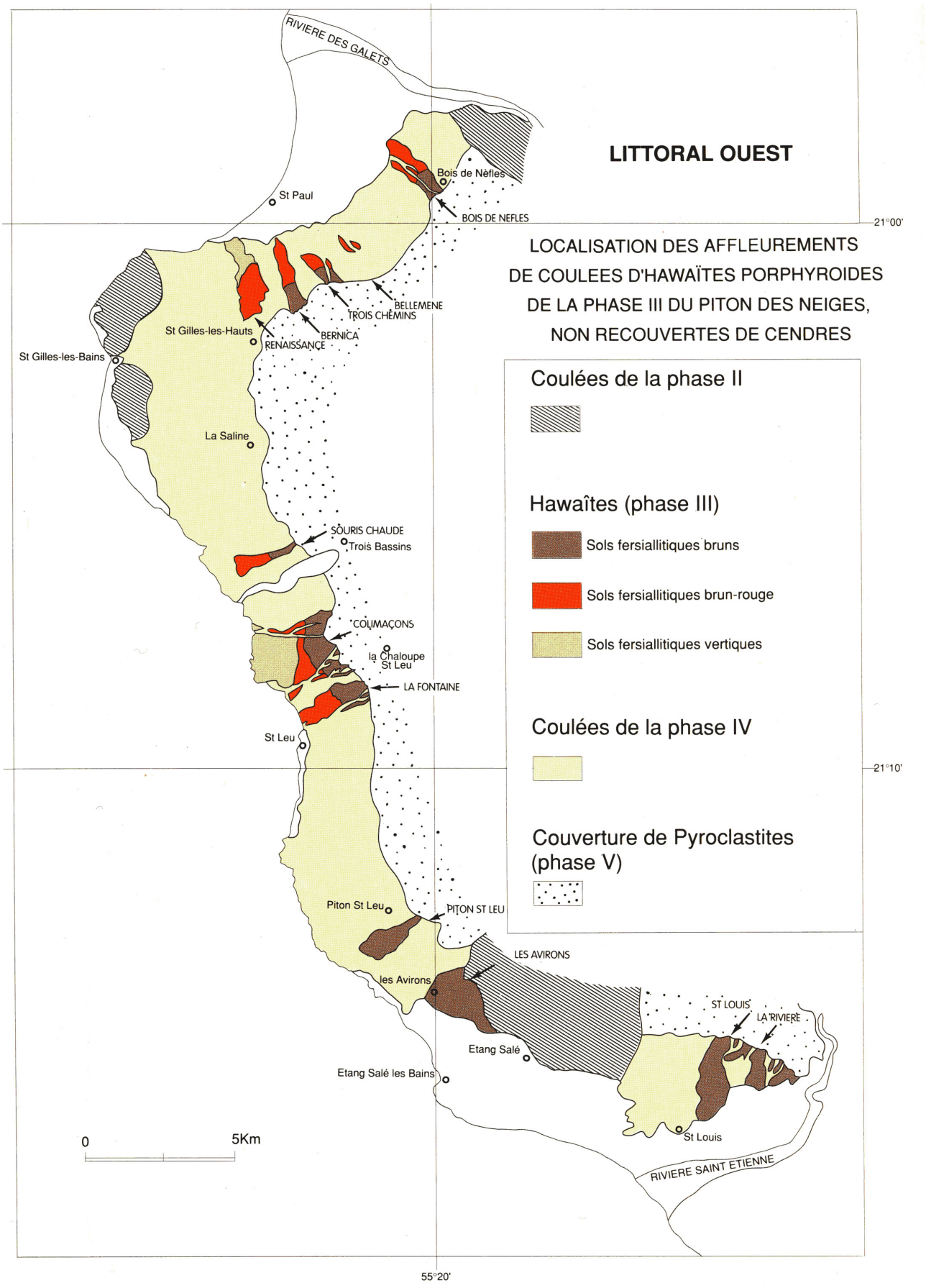
Nous ne nous intéresserons ici qu'aux coulées d'hawaïtes portant leurs propres altérations et non à celles qui sont encore recouvertes des cendres de la phase V sur lesquelles se sont développés les sols andiques. D'autre part, les nappes de la phase III étant souvent recouvertes et cachées par les nappes de la phase IV, leur superficie directement affleurante est relativement faible (2 500 hectares). On ne les observe qu'à basse altitude (en dessous de 400 mètres). Aussi bien sur les faces au vent que sous le vent, leurs altérations se différencient bien de celles des coulées des phases Il et IV encadrantes.

Leur différenciation en unités de milieu spécifiques est donc tout à fait justifiée. La subdivision qui s'impose ici est relative à la pluviosité ; c'est l'exposition «au vent» ou l'exposition «sous le vent», commandant les types d'altération, ferrallitique dans le premier cas, brunifiante ou fersiallitique dans le second cas.

6.3.1 Exposition «sous le vent» sols bruns et fersiallitiques unités 13, 14, 15)

Des coulées d'hawaïtes de la phase III s'observent, en dessous de 400 mètres d'altitude entre la Rivière des Galets et la Rivière Saint Etienne, au total, sur 1 560 hectares (Fig. 6.6). Toutes ces laves présentent le facies «pintade» à gros cristaux blancs de plagioclase, se distinguant bien du facies aphyrique gris clair des mugéarites de la phase IV qui les recouvrent en grande partie. Un critère complémentaire de différenciation de ces 2 formations sur le terrain, est la forme de leurs affleurements respectifs : les mugéarites présentent des cassures anguleuses «fraîches» sans altération notable, alors que les hawaïtes montrent plutôt des blocs émoussés, résidus d'une altération antérieure en boules et «pelures d'oignons», libérées ensuite par le décapage. Dans les coupes, les hawaïtes porphyroïdes montrent, soit une matrice rougeâtre (en dessous de 300 mètres d'altitude en général), soit une arène feldspathique jaunâtre (plutôt au-dessus de 300 mètres). Ce sont des «racines» d'altération que ne possèdent pas les coulées de la phase IV, à pédogenèse moins évoluée.

FIG. 6.6 – *LOCALISATION DES AFFLEUREMENTS DE COULEES D'HAWAITES PORPHYROIDES DE LA PHASE III DU PITON DES NEIGES, NON RECOUVERTES DE CENDRES*



(.jpg)

A la lumière d'une cartographie plus détaillée (cartographie à l'échelle du 1/10 000) effectuée dans la région littorale occidentale de l'île, postérieurement à cette étude, et alors que l'édition de la carte morphopédologique ci-jointe était en cours, donc plus modifiable, nous avons été amenés à préciser un peu mieux les altérations des coulées d'hawaïtes ainsi que leurs localisations. En conséquence, ce que nous avons intégré à l'échelle du 1/50 000, dans l'ensemble des «sols bruns», a par la suite été classé dans la catégorie des «sols fersiallitiques», un peu plus épais et plus «évolués» que les précédents. La figure 6.6 résume la retraduction opérée.

Qu'appelle-t-'on «sols fersiallitiques»?

Morphologiquement, lorsqu'il s'agit en tout cas des «fersiallitiques tropicaux» (pour les distinguer des «fersiallitiques méditerranéens»), ce sont des sols souvent développés sur roches basiques, intermédiaires entre les sols ferrallitiques et les sols bruns eutrophes tropicaux ; ils sont, d'une part, moins épais que les premiers (sans «racine» d'altération très profonde) et plus épais que les seconds, d'autre part avec une coloration, dans les brun rougeâtre, également intermédiaire.

Du point de vue minéralogique, ils montrent une évolution hydrolytique moins poussée que les ferrallitiques ; dans l'horizon (B) coloré supérieur il n'y a jamais de gibbsite, le fer n'est pas totalement libéré (Fer libre/Fer total = 30 à 50 %) ; sur roches basiques, les minéraux phylliteux sont un mélange de métahalloysite, d'halloysite, de smectite, et d'interstratifiés (metahalloysite/smectite). Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est compris entre 2 et 2,5. Lorsque la pente diminue, l'horizon B peut acquérir assez vite des caractères vertiques ; on passe alors aux «bruns vertiques» ou «fersiallitiques vertiques».

A la Réunion, la couleur des fersiallitiques sur les hawaïtes de la phase III dépend de l'altitude et du drainage (donc de la pente) :

- en dessous de 300 mètres, avec une pluviosité inférieure à 800 mm
  - si la pente est supérieure à 15 %, les sols sont brun-rouge (le fer est peu hydraté), la structure, très bien développée, est de taille moyenne. Les sols (photo A.21) sont riches en métahalloysite et interstratifiés (smectite/metahalloysite). C'est alors le domaine des sols fersiallitiques brun rouges modaux (intégrés dans les sols bruns ferruginisés dans l'unité 15 de la carte à l'échelle du 1/50 000) Dans l'horizon B, ces sols ont des pH de 6,5 à 6,8, une capacité d'échange de 17 mé/100 g, une saturation de 80 % ; leur taux de matière organique en surface est de 3 %.
    On trouve essentiellement ces sols entre Bois de Nèfles et Piton Saint-Leu.
  - si la pente est inférieure à 15 %, les caractères vertiques apparaissent plus large structuration, quelques «faces de glissement», couleur plus terne. Les sols s'enrichissent en montmorillonite. Ce sont des sols «bruns vertiques», qu'il vaut mieux en fait appeler «fersiallitiques vertiques» pour insister sur la filiation génétique. En B, le pH est de l'ordre de 7, la capacité d'échange d'environ 25 mé/100 g ; ils sont saturés. On les trouve à Plateau Cailloux (la Renaissance) et à la Pointe des Châteaux (aval des planèzes des Colimaçons). On n'en trouve pratiquement plus au sud de la Pointe des Châteaux, entre Saint-Leu et Saint-Louis, la pluviosité étant déjà supérieure à 800 mm.
- au-dessus de 300 mètres d'altitude ou quand la pluviosité est supérieure à 800 mm

La couleur des sols est moins vive (brune à brun-jaunâtre), le fer est plus hydraté (goethite), l'arène sous-jacente à l'horizon B, de couleur jaunâtre, est moins argilifiée. Or, y reconnait parfaitement les phénocristaux de feldspath. Nous parlerons alors de sols «fersiallitiques bruns». Ces sols s'observent, souvent sur pentes fortes (20 à 40 %) à Bois de Nèfles et Bernica, mais surtout à partir des Colimaçons, jusqu'à Saint Louis, zone où la pluviométrie augmente sensiblement (de 800 à 1 000 mm) ; les fersiallitiques perdent alors de plus en plus leur couleur rouge. Aux Avirons, à Saint Louis et à La Rivière, même à l'aval extrême des planèzes, il n'y a plus que des sols fersiallitiques bruns sur arène fedspathique jaunâtre, sans jamais de sols vertiques associés même sur pentes faibles (contrairement à ce qu'on voit au nord de Saint Leu). Dans l'horizon B épais (100 - 150 cm), les sols fersiallitiques bruns sont un peu plus acides que les rouges (pH de 6,2 à 6,4) et possèdent une capacité d'échange plus faible (10 à 12 mé) ; ils sont moins saturés (V = 60 à 80 %). Par contre, ils sont un peu

plus riches en matière organique (4 à 5 % en surface). Ces sols ne contiennent probablement pas de smectites ni d'interstratifiés, contrairement aux sols brun-rouge, qui, eux, sont associés à des sols vertiques.

- Qualités agronomiques

En règle générale, les sols fersiallitiques, étant plus anciens, sont sensiblement plus épais que les sols bruns auxquels ils sont associés ; ceci bien sûr, pour des conditions de pentes et de pluviométrie semblables. Leur charge en éléments grossiers n'est pas la même en qualité et quantité alors que les sols bruns libèrent des blocs anguleux de toutes tailles, les sols fersiallitiques libèrent plutôt des grosses boules et blocs émoussés (roche «pintade» pouvant dépasser le mètre cube. Ces blocs, lorsqu'ils sont déracinés et poussés au bull, sont assez aisément isolables de leur gangue d'altération, plus profonde que sous les sols bruns (photo A.23).

Les «panneaux» les plus blocailleux sont compris entre Bois de Nèfles et Piton-Saint-Leu (Fig. 6.6). Ceux des Avirons, de Saint-Louis et de La Rivière le sont beaucoup moins.

Seuls sont actuellement cultivés (canne à sucre) les sols fersiallitiques bruns, arrosés par plus de 800 mm de pluie. Au sud de Saint-Leu, ils bénéficient de l'irrigation ; au nord pas encore, et la sécheresse y est le premier facteur limitant. Concernant ces sols, la deuxième contrainte est localement la pente excessive qui les expose à une érosion accélérée, spécialement sous cultures vivrières et maraîchères. De ce point de vue, les zones les plus sensibles sont Bois de Nèfles, Trois-Chemins, SourisChaude, Colimaçons, La Fontaine et Piton-Saint-Leu. La pente générale y dépasse souvent 30 % et il est déconseillé d'y pratiquer des cultures annuelles. Ces versants doivent restés boisés ou être consacrés à l'arboriculture peu mécanisée. Il faut dire qu'actuellement sur sols bruns et fersiallitiques, les chantiers d'épierrage et de défrichements au bulldozer ne respectent généralement ni les pentes ni les sols et font craindre le pire (photo A.24). Les pentes inférieures à 20/25 % demanderont des pratiques culturales anti-érosives comparables à celles sur sols bruns (voir plus loin).

Concernant les sols fersiallitiques brun-rouge (Fig. 6.6), encore non cultivés, ils sont pour la plupart soit en cours de lotissement (Bois de Nèfles, Bernica, La Renaissance), soit en pente trop forte (Souris-Chaude, Colimaçons, La Fontaine) pour qu'on y envisage autre chose que l'arboriculture (irriguée au goutte à goutte).

Quant aux sols fersiallitiques vertiques, à pentes faibles, ils sont également soustraits à l'agriculture (Plateau Cailloux, Pointe des Châteaux).

6.3.2 Exposition «au vent» sols ferrallitiques (unité 16)

Les coulées de la phase III affleurent sur environ 925 hectares, entre la Rivière des Pluies et Saint Benoît, en trois endroits principaux :

- Sainte Marie : planèzes arrivant jusqu'à la mer, sur la rive droite du cône de déjection ancien de Gillot,
- Bras Panon : planèzes terminales au pied du massif d'Eden,
- Saint Benoît : entre la Rivière des Marsouins et le massif du Cratère.

Entre Sainte Marie et Sainte Suzanne, les coulées de la phase IV recouvrent les hawaïtes sur une faible épaisseur. Les falaises littorales et les tranchées de la route nationale permettent de voir le contact où s'imbriquent parfois des formations alluviales à galets, plus ou moins altérées, signalant d'anciennes arrivées de ravines ennoyées sous les laves. En revanche, à l'Eden et au Cratère, les coulées de la phase III n'ont pas été nappées par les mugéarites ultérieures.

- Les sols

Toutes les planèzes de phase III situées au nord de l'île sont couvertes de sols ferrallitiques cultivés en canne à sucre.

Les sols sont rouges. Cette couleur est plus vive que celle des sols ferrallitiques moins «évolués» des coulées de la phase IV (unité 17) qu'ils jouxtent souvent. Par rapport à ces derniers, ils sont également plus épais.

L'horizon B, rouge, très bien structuré et sans éléments grossiers, peut faire 2 mètres. La zone d'altération sous-jacente, à faciès en boules et écailles concentriques, est nettement moins profonde que pour les basaltes de la phase II (voir plus haut).

Ces sols sont faiblement acides (pH 5 à 5,5). Leur capacité d'échange est faible (CEC = 5 à 8 mé/100 g) ; le complexe adsorbant est moyennement désaturé (V = 50 à 60 %). Contrairement aux sols ferrallitiques sur océanites et basaltes à olivine de la phase II, leur rapport Mg/Ca est toujours inférieur à 1.

Tous ces sols font partie des «terres franches» du littoral nord. Ils sont cultivés en canne à sucre en petites exploitations (moins de 5 ha) à Saint Benoît et Bras Panon, en moyennes et grandes à Sainte-Marie. Les pentes faibles permettent la mécanisation intégrale. Les problèmes agronomiques sont peu nombreux ; ce sont les mêmes que ceux des autres sols ferrallitiques du littoral nord (unité 17, plus loin), à savoir :

- nécessité du chaulage,
- nécessité d'une décompaction du bout d'un certain nombre d'années de mécanisation.

Les apports de fertilisants azotés et potassiques devraient être étalés dans le temps, surtout à Saint Benoît et Bras Panon où la pluviométrie excessive entraîne une lixiviation intense et des pertes en profondeur.

6.4 Les coulées de la phase IV (unités 17 à 26)

La phase IV du Piton des Neiges a commencé il y à 230 000 ans environ pour se terminer vers 70 000 ans. Les roches sont essentiellement des «mugéarites», c'est-à-dire des andésites alcalines assez claires, riches en silice (50 à 52 % SiO_2), assez pauvres en magnésium (4 % MgO) et en calcium (7 % CaO).

Les mugéarites (coulées autobréchifiées et coulées «aa») ont recouvert une superficie considérable ; elles ont été nappées postérieurement par les pyroclastites de la phase V, qui, en dessous de 350 mètres d'altitude, ont été remaniées ou décapées par l'érosion (Fig. 6.1). Du point de vue sols, nous ne parlerons donc ici que de ces parties basses développant une pédogenèse directement aux dépens des mugéarites.

Cet ensemble représente 10 300 hectares (ravines non comprises) répartis en :

- pédogenèse ferrallitique «au vent» (4 000 ha),
- pédogenèses brunifiante et vertique, associées à des rocailles, «sous le vent» (6 300 ha).

6.4.1 Les zones de basse altitude «au vent» unités 17 et 18)

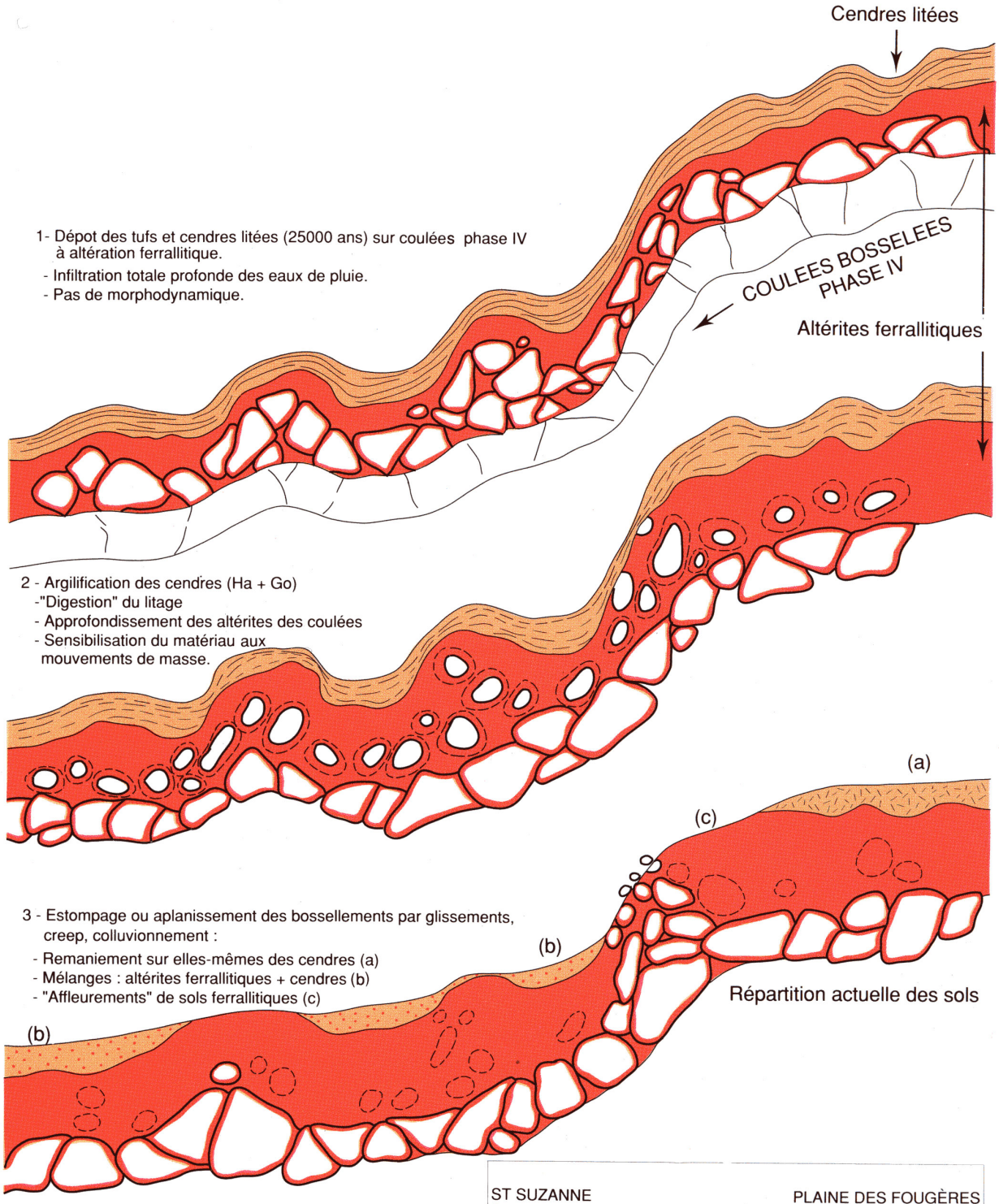
Cette bande s'étend de Saint-Denis à Saint-André et ne dépasse pas 200 mètres d'altitude. Elle correspond à des extrémités de planèzes possédant un modelé très adouci, à allure de «glacis», à sols le plus souvent épais, couverts de plantations sucrières (photo A.53). La pluviosité moyenne annuelle croît d'ouest en est, de 1 500 à 3 000 mm.

Les coulées de la phase IV sont ici peu épaisses. La «roche pintade» (hawaïtes) de la phase III, à sols de couleur rouge plus vive, n'est souvent recouverte que par quelques mètres de mugéarites, comme on l'observe le long des falaises littorales. Des affleurements d'hawaïtes sont abondants, surtout vers Sainte-Marie et Sainte-Suzanne.

L'altération des mugéarites, au nord de l'île, est nettement plus avancée que sur le versant ouest (sous le vent), où seul le stade brunifié est atteint. Au nord, on a déjà le stade ferrallitique : les sols y montrent un horizon B épais, brun rougeâtre. Cependant, ils sont souvent mélangés à des poches et placages de matériaux remaniés mixtes englobant des altérations ferrallitiques et des cendres andiques, contribuant à épaissir encore davantage

la couche meuble (dite «terre franche» à la Réunion). En effet, les nappages pyroclastiques de la phase V ont concerné cette zone comme l'ensemble du Piton des Neiges en régularisant la topographie bosselée des coulées. La morphodynamique de glissements et fluages locaux (Fig. 6.7) a décapé en grande partie ces formations dans la région littorale ; il en reste cependant de nombreux résidus remaniés épars (anciens creux colluvionnés), à héritages de couleur brun ocre, à la fois andiques et ferrallitiques que nous n'avons pas pu cartographier séparément. Par contre, cette couche épaisse, à pédogenèse mixte, est encore générale au-dessus de 200 mètres d'altitude jusqu'à 400 mètres environ ; nous en parlerons plus loin à propos des unités 30 et 31.

FIG. 6.7 – *INTERACTIONS ENTRE LES PROCESSUS D'ALTERATION DES MATERIAUX ET D'APLANISSEMENT DU MODELE DANS LE SYSTEME «CENDRES (25000 ANS) SUR COULEES PHASE IV (100 000 ANS)»*



(.jpg)

Les sols ferrallitiques sont développés le plus généralement sur coulées «aa» ou autobréchifiées. Cela explique que la zone d'altération ne présente pratiquement pas de boules arrondies résiduelles à desquamation en écailles, à l'inverse des coulées en dalles de la phase III («pintade») qui isolent de grosses boules caractéristiques. C'est souvent , en plus de la différence de coloration de la matrice (plus rouge sur phase III), un des critères de discrimination sur le terrain. A la base, la roche pourrie est sous la forme d'éléments anguleux issus de «gratons», de teinte gris clair à rosé, à imprégnations manganiques noires fréquentes. Au-dessus, la matrice argileuse halloysitique de l'horizon B (1 à 2 mètres d'épaisseur) est brune à brun rougeâtre, bien structurée. Ces caractères contribuent à différencier les sols à dominance ferrallitique de ceux qui y sont souvent imbriqués, à dominance andique sur remaniement de cendres. Ces derniers sont plutôt brun jaunâtre, alors que les premiers sont brun rougeâtre. Un autre critère utile de distinction est la «tenue» des tranchées de route : sur matériau ferrallitique, le talus ne reste pas totalement vertical, sa structuration polyédrique lui faisant prendre une inclinaison ; sur matériau andique, au contraire, le talus se maintient beaucoup mieux, la structure étant plus continue.

Du point de vue analytique, les sols faiblement ferrallitiques de la phase IV présentent les caractéristiques moyennes suivantes :

- en surface (horizon anthropisé) :
  - 3 à 5 % de matière organique, C/N = 10,
  - pH = 4,9 à 5,4,
  - phosphore assimilable = 50 à 300 ppm,
  - Ca = 3,5 mé/100 g,
  - Mg = 3 mé/100 g,
  - K = 0,4 mé/100 g,
  - CEC = 9 mé/100 g,
  - V = 90 %.
- en profondeur (horizon B) :
  - 1 % de matière organique,
  - C/N = 11,
  - pH = 5,5,
  - phosphore assimilable = 20 ppm,
  - phosphore total = 800 ppm,
  - Ca = 2 mé/100 g,
  - Mg = 1,3 mé/100 g,
  - K = 0,03 mé/100 g,
  - CEC = 6 mé/100 g,
  - V = 75 %,
  - Mg/Ca = 0,6.

Sur la carte, ont été différenciées deux unités :

- l'unité 17 : Sols ferrallitiques faiblement désaturés, à horizon B épais brun à brun rougeâtre.
- l'unité 17 : Sols ferrallitiques érodés jusqu'à l'horizon d'altération, de couleur brun-foncé ; cailloutis altérés dès la surface.

Du point de vue géomorphologique, la seconde unité correspond aux zones rabotées par la dynamique de glissement des altérations, ces dernières constituant à l'origine à ces endroits, les points hauts des coulées de la phase IV. Sur l'unité 17, en revanche, les altérations ferrallitiques n'ont pas été entièrement décapées. C'est en son sein que se trouvent encore des lambeaux «mixtes», intégrant des résidus cendreux andiques mélangés aux halloysites ferrallitiques, qui seront généralisés dans les unités 30 et 31 (voir plus loin).

Problèmes agronomiques

Les sols ferrallitiques des régions de Sainte Marie et Sainte Suzanne, en monoculture de canne, sont qualifiés de «terres franches» car elles sont épaisses, sans cailloux, faciles à travailler et intégralement mécanisables. Une grande partie des exploitations appartenait autrefois aux grandes sociétés sucrières. Les Sucreries de Bourbon possèdent encore (1.990) de grands ensembles de 30 à 400 hectares, autour de Sainte Marie. Une autre catégorie d'exploitations, prenant de plus en plus d'importance, sont celles de 5 à 10 hectares, résultant, depuis une dizaine d'années, de rachats et rétrocessions de terrains des Sucreries de Bourbon par la SAFER (A.3). Enfin existe un certain nombre de grosses exploitations individuelles de 10 à plus de 100 hectares. Les exploitations sont en grande partie mécanisées. Les plus grandes sont coupées mécaniquement. La production est drainée par l'usine de Bois-Rouge. En repousses, le rendement moyen est de 8085 t/ha. Le maximum est autour de 140 t/ha. L'irrigation n'est pratiquée que sur moins de 50 hectares.

Ces sols ne possèdent pas de contraintes importantes, si ce n'est qu'ils présentent une fertilité chimique plutôt faible (en surface, pH = 4,9 à 5,4 et CEC = 9 mé/100g). Leur richesse en phosphore «assimilable» est extrêmement variable (faible à forte) car elle dépend de leur fertilisation antérieure sous canne : comprise entre 50 et 300 ppm en surface, elle chute brusquement à 20 ppm, en dessous de 30 cm de profondeur. Il en est de même de leur teneur en potassium qui s'étale entre 0,2 et 0,6 mé/100 g. Celle-ci a été améliorée par la fertilisation régulière ; elle est actuellement correcte en surface, mais chute en dessous de 30 cm (0,03 mé/100 g).

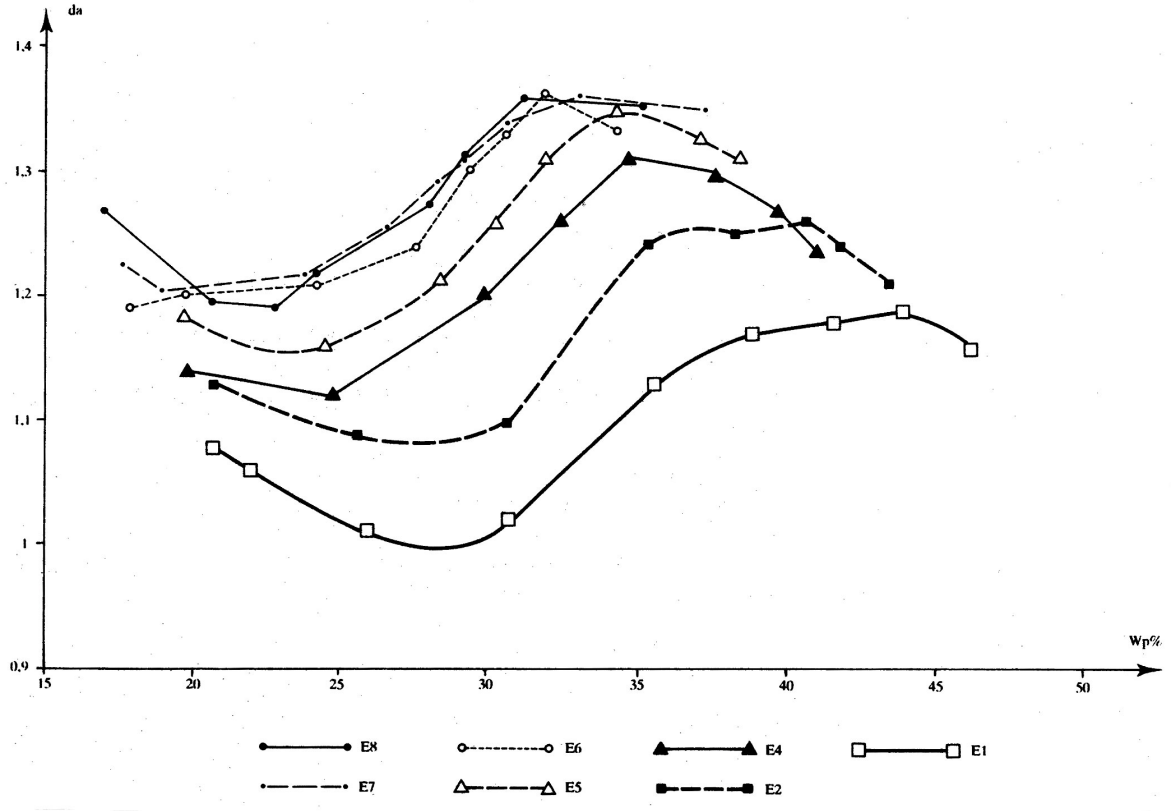
En règle très générale, ces sols, «anthropisés» par la monoculture intensive ancienne de la canne et les engrais, ont été acidifiés en surface (abus de sulfate d'ammoniaque ?), enrichis en phosphore et en potasse ; sans fertilisation, ces sols seront fortement carencés en phosphore, potassium et calcium. La légère acidification montre que jusqu'à présent le chaulage des sols a été insuffisant. Le plan de fumure que l'on conseille actuellement est :

- à la plantation 300 unités de $P_2 0_5$ (par exemple 1 tonne d'hyperphosphate)
- sur chaque repousse : 150 unités de N et 240 unités de K_2O (750 kg de binaire 20-0-33).

Concernant le chaulage, son apport et sa dose doivent être décidés en fonction du pH. Tant que le pH reste inférieur à 5,5 dans les 30 premiers centimères, il faut chauler. Si le pH est de 5, une dose de 3 à 5 t/ha de CaC03 à chaque replantation (tous les 6 ans) devrait suffire pour remonter et stabiliser le pH au-dessus de 5,5.

Un autre problème qui mérite attention en monoculture intensive mécanisée de canne, est celui du compactage des sols par les passages répétés des engins lourds de récolte. Ces sols argileux à halloysite, qui, à l'inverse des sols bruns du littoral ouest se dessèchent peu au moment des récoltes, sont sensibles au compactage. A l'heure actuelle, dans cette zone, au moins 25 % de la superficie est récoltée en mécanisation intégrale. Dans les années qui viennent cette proportion augmentera de plus en plus compte tenu des problèmes de main - d'oeuvre.

FIG. 6.8 – *Essai Proctor sur sol ferrallitique de Sainte-Marie Multiplication de l'énergie unitaire simulée dune récolte mécanisée de canne (El à E8)*



(.jpg)

Des tests PROCTOR réalisés par le CEEMAT (A.3) (1989) appliquant à des échantillons 1 à 7 fois l'énergie correspondante à une récolte mécanisée, ont montré (Fig. 6.8) que :

- l'humidité (Wp - opt) «dangereuse» correspondant à la densité maxima atteinte (da - max), diminue au fur et à mesure qu'on augmente régulièrement, jusqu'à 6 fois, l'énergie simulée de la récolte. Ensuite, elle ne bouge plus jusqu'à 7 récoltes simulées.
- la densité maxima atteinte (da - max), qui est faible pour une seule récolte simulée (1,19), est la plus élevée (1,36) au bout de 6 récoltes simulées, après quoi (jusqu'à 7 récoltes), elle reste constante, tout comme Wp - opt. C'est-à-dire que, de 6 à 7 récoltes simulées, les courbes PROCTOR se chevauchent.

Par ailleurs, CLARIOND, PERRET et SIEGMUND (1989), du CEEMAT (A.3), ont également montré qu'au bout de 2 ans de mécanisation intégrale, ces sols ferrallitiques se «fatiguent», pouvant aller jusqu'à diminuer le rendement en canne de 10 % par rapport à un témoin non mécanisé.

La solution préconisée est le décompactage - sous-solage au «paraplow» travaillant à 35 cm de profondeur, dans l'interligne après la récolte, tous les 2 à 5 ans. L'effet sur les rendements est augmenté si on monte sur le décompacteur un distributeur d'engrais localisant ceux-ci vers 20 cm de profondeur en interligne. On peut penser que le chaulage apporté de cette façon aurait également un effet bénéfique.

6.4.2 Les zones de basse altitude «sous le vent» (unités 19 à 26)

Dégagées par l'érosion de leur couverture pyroclastique récente, les mugéarites altérées s'observent sur tout le panneau occidental en dessous de 450 mètres d'altitude, depuis Sainte-Thérèse au nord jusqu'à Saint-Louis au sud. Ils représentent environ 6 300 hectares (ravines exclues). Seules quelques langues d'hawaïtes (phase III) et quelques reliefs d'océanites (phase II) n'ont pas été recouverts par les coulées de la phase IV (Fig. 6.6).

Dans cette région (photo A.17), la pluviosité moyenne annuelle croît du littoral en altitude. Le minimum est de 550 mm à Saint-Gilles-les-Bains et le maximum, de 1 250 mm vers 450 mètres d'altitude. La saison sèche y est très marquée, avec 5 à 7 mois à moins de 50 mm (Fig. 3.4).

La zonation pédo-climatique, du haut vers le bas, est schématiquement la suivante (Fig. 6.9) :

- 300 à 450 mètres d'altitude : pédogenèse brunifiante non ferruginisée (unités 19 et 20), représentant environ 2 700 hectares.
- 50 à 300 mètres d'altitude : pédogenèse brunifiante ferruginisée (unités 21, 22 et 23) intéressant une superficie de 2 600 hectares.
- 0 à 50 mètres d'altitude : pédogenèse vertique associée à des affleurements directs (unités 24, 25 et 26), soit environ 1 000 hectares.

Cette zonation, commandée par le régime hydrique et les contrastes saisonniers, correspond à un enrichissement progressif en argiles gonflantes (halloysite –> interstratifiés -> smectites) et en fer libre qui colore les sols (goethite puis hématite). D'autre part, du haut vers le bas de la toposéquence, les sols ont subi des troncatures par l'érosion, de plus en plus fortes, en relation avec l'augmentation de l'agressivité des pluies, conséquence de la diminution de la couverture végétale originelle (due à l'aridification du climat) accélérée par l'arrivée de l'homme et de ses animaux domestiques (chèvres...).

En conséquence les sols deviennent moins épais et les affleurements rocheux plus abondants au fur et à mesure que l'on se rapproche du littoral. L'intensité du décapage a évidemment été modulée en fonction de la raideur des pentes (Fig. **??**).

6.4.3 Les sols bruns non ferruginisés unités 19 et 20)

Cet ensemble intéresse en gros la bande d'altitude 300 - 450 mètres (photo A.17). Au-dessus de 400/450 mètres, on passe progressivement aux (recouvrements cendreux quasi généralisés, donc au grand domaine des andosols (Fig. 6.9).

C'est parmi les sols bruns non ferruginisés, spécialement entre la ravine Bernica et la ravine des Trois-Bassins, que l'on trouve les meilleures zones agricoles de la Réunion, des points de vue potentiel de fertilité, épaisseurs de sol et conditions de pentes. Ces terroirs sont arrosés par 1 000 à 1 250 mm de pluviosité, ce qui, en l'absence d'irrigation, est suffisant pour les cultures annuelles, mais en revanche (compte tenu des 6 mois de saison sèche), très marginal pour les cultures pérennes (fruitiers...) et la canne à sucre qui, si elle était irriguée, avec un tel ensoleillement, atteindrait les meilleurs rendements en sucre de l'île.

Caractères des sols

Les sols bruns sont développés sur mugéarites en «gratons» (coulées «aa» et autobréchifiées). Le profil moyen montre la succession suivante :

- 0 à 30 cm : horizon humifère brun grisâtre foncé anthropisé (par la culture de la canne à sucre), structure polyédrique fine, peu d'éléments grossiers.
  Caractères analytiques :
  - 4 à 5 % de matière organique bien humiliée (C/N.=10 à 11),
  - azote total = 2 %, ;
  - pH = 6,3 ;
  - CEC = 13 mé/100 g de sol, dont :
    - Ca = 6,5 mé,
    - Mg = 4 mé (Mg/Ca = 0,6),
    - K = 0,4 mé,
    - Na = 0,3 mé ;
  - saturation du complexe adsorbant = 95 % ;
  - phosphore assimilable = 30 à 100 ppm,
  - phosphore total = 800 à 1 200 ppm.
- 30 à 60/80 cm : horizon B, brun foncé à brun-grisâtre, fortement structuré (structure polyédrique anguleuse moyenne à grossière). Texture argileuse (42 % d'argile, 42 % de limon, 16 % de sable) ; proportion d'éléments grossiers (constitués de roche altérée grisâtre) très variable (10 à 40 %) en liaison avec la pente et le remaniement par colluvionnement.
  Caractères analytiques :
  - 1 % de matière organique (C/N = 13),
  - azote total 0,4 %. ;
  - pH = 6,0 ;
  - pH (KCI) = 5,20 ;
  - CEC = 8,5 mé/100 g de sol, dont :
    - Ca = 5.mé,
    - Mg = 3 mé (Mg/Ca = 0,6),
    - K = 0,1 mé,
    - Na = 0,3 mé ;
  - saturation du complexe adsorbant = 90 % ;
  - phosphore assimilable = 20 ppm,

  - phosphore total = 400 ppm.

  La densité apparente de la terre fine est de l'ordre de 1,3. La perméabilité (Muntz à saturation) est d'environ 40 mm/h.
- 60/80 cm à 120/150 cm : la proportion d'éléments grossiers augmente ; on rentre dans la zone d'altération des «gratons» ; il y a peu de boules à «écailles» comme sur les coulées plus anciennes. Ici les éléments sont plutôt anguleux, grisâtres à rosés, souvent à incrustations manganiques noirâtres. La matrice argilifiée est brune. L'ensemble prend une certaine compacité par rapport aux horizons supérieurs, mais les racines peuvent encore bien exploiter ce milieu.
- au-delà de 120/150 cm : mugéarite en cours d'altération ; blocs et pierrailles dominants, peu d'argile. Seules quelques grosses racines peuvent s'insinuer. Ce n'est plus le sol «agricole» proprement dit. Les minéraux argileux de ces sols sont à dominance d'halloysite et de goethite.

Les modelés

En fonction du modelé, 2 unités de milieu ont été distinguées :

- les secteurs à pentes faibles ou modérées (0 à 20 %),
- les secteurs à pentes fortes (20 à 40

1. Les sols bruns sur pentes faibles ou modérées (unité 19)
   Ils constituent l'ensemble le plus intéressant, avec environ 1 000 hectares, répartis en 2 blocs principaux :

   - Ravine Bemica à Ravine des Trois Bassins = 650 hectares
   - Nord de Saint-Louis : 380 hectares

   La première zone forme des plateaux perchés entre 300 et 450 mètres d'altitude ; la genèse de ces plateaux s'explique par le fait que les coulées des phases III et IV se sont appuyées contre et à l'arrière des massifs des «tufs de Saint-Gilles». Cette région est cultivée en canne à sucre non irriguée, souffrant de la sécheresse.
   La deuxième zone s'appuie sur des terminaisons de planèzes, entre 20 et 250 mètres d'altitude. La canne peut y bénéficier de l'irrigation à partir du Bras de Cilaos.
   Le modelé de ces zones est généralement assez régulier. La topographie bosselée d'origine des coulées y a disparu tout comme la plupart des recouvrements pyroclastiques (tufs et cendres) qui se maintiennent cependant encore sous la forme de lambeaux non cartographiés. L'érosion, postérieurement au dépôt des pyroclastites, a en effet pu «raboter» et régulariser efficacement ces coulées, contrairement aux zones situées au delà de 500 mètres d'altitude qui, elles, ont conservé leurs bossellements initiaux et leur couverture cendreuse.
   A l'origine de cette morphodynamique différentielle, il y a la «préparation» du matériau, à savoir une altération et une argilification plus accentuées sur les coulées situées en dessous de 500 mètres par rapport à celles qui sont au-dessus, ceci à cause du climat chaud qui accélère l'hydrolyse des minéraux. Au-dessus de 500 mètres, on constate en effet, sous le manteau cendreux, que les mugéarites ne présentent qu'une assez faible altération.
   Entre 300 et 500 mètres, l'argilification des roches a favorisé la morphodynamique de glissements localisés des altérites, avec nivellements de la méso-topographie et façonnements de pseudo-glacis, comme nous l'avons également observé entre Saint-Denis et Sainte-Suzanne sur les sols ferrallitiques (Fig. fig41).
   Dans nombre de cas, sur ces zones planes, les sols bruns sont constitués de placages mixtes issus de cendres et d'altérites de coulées, colluvionnées ensemble. Dans le détail, le matériau superficiel peut donc être relativement complexe.
   Quoi qu'il en soit, dans cette unité 19, en plus de la topographie favorable, permettant la mécanisation, on peut compter en général sur des sols épais (150 cm), sans pierrosité gênante et une bonne réserve utile en eau (de l'ordre de 140 mm). Ce sont les meilleurs sols de l'île. S'ils sont utilisés pour d'autres cultures que la canne, il conviendra de les protéger efficacement contre l'érosion.

2. Les sols bruns sur pentes fortes à très fortes (Unité 20)
   Les pentes supérieures à 20 % (jusqu'à 40 %) concernent un secteur de 1 700 hectares, d'une part entre Bois de Nèfles et Bernica, d'autre part, entre Trois-Bassins et les Avirons (photo A.17). Tout ce qui n'est pas loti est cultivé en canne à sucre, mais la topographie ne permet généralement pas sa mécanisation. En plus des pentes fortes, ces zones sont découpées en lanières par de très nombreuses ravines qui entaillent les coulées tous les 500 à 1 000 mètres.
   Les versants sont toujours «structuraux», c'est-à-dire que leurs pentes coïncident avec les pendages des coulées. La plupart du temps, ces versants ne sont pas réguliers : ils sont coupés et alternent, d'amont en aval, avec des replats qui s'étagent ainsi en marches d'escalier de faibles étendues et qui sont plus intéressants pour l'agriculture. A l'inverse, de nombreux fronts de coulées forment des ressauts rocheux très pentus inexploitables.
   Les sols bruns non ferruginisés de ces versants présentent une forte hétérogénéité spatiale ; ils sont moins épais et plus caillouteux que les précédents, car plus «remaniés» par les mouvements colluviaux. Ils possèdent 20 à 50 % d'éléments grossiers, parfois sous forme de gros blocs (jusqu'au m^3) nécessitant des épierrages (région de Piton Saint-Leu par exemple).
   On peut compter en moyenne sur 50 à 100 cm de profondeur exploitable par les racines, ce qui correspond à une réserve en eau utile de 70 à 90 mm. Leur aptitude est moyenne avec 20 à 30 % de pentes, ou faible lorsqu'ils possèdent plus de 30 % de pente, ce qui est le cas pour environ 70 % de la superficie totale entre Trois-Bassins et les Avirons. Dans ce dernier cas, il serait préférable de reboiser. Les plus fortes pentes sont souvent déjà occupées par des boisements denses à Schinus terebenthifolius («encens» ou «faux poivrier») et Litsea glutinosa («avocat marron»).
   Entre 20 et 30 % de pente, les cultures pérennes type canne à sucre ou arboriculture sont préférables aux cultures vivrières beaucoup plus dangereuses pour l'érosion. La mécanisation y est généralement impossible sauf sur les replats épars de faible dimension. Les aménagements et pratiques anti-érosives sont indispensables (photo A.29).

Utilisation agricole

Les sols bruns non ferruginisés de l'ouest sont quasi-intégralement cultivés en canne à sucre. La côte d'altitude 300 mètres y correspond à la bordure aval de la ceinture sucrière. Au nord de Saint Leu, jusqu'à Sainte Thérèse, il est prévu que tous les sols bruns bénéficient de l'irrigation lorsque le programme «basculement des eaux» sera achevé (à partir de 1995 ?). Au sud de Saint Leu, jusqu'au niveau de Saint Louis, une grande partie des sols bruns peuvent déjà être irrigués à partir du Bras de Cilaos. La canalisation principale de 20 km est à 310 mètres au réservoir du Gol-lesHauts et à 230 mètres à La Ravine du Cap près de Saint Leu. Ce périmètre est géré par la SAPHIRA.3. La majeure partie de la canne est cultivée par de «petits et moyens planteurs» en colonat, et, de plus en plus en faire-vaIoirdirect, sur des exploitations de 1 à 3 hectares. Les exploitations les plus grandes et les moins morcelées sont situées sur les grands «plateaux» de l'Eperon, de Plateau Carrosse et de Vue-Belle. La moyenne est alors de 3 à 5 hectares, certaines faisant 10 à 50 hectares. Les domaines ayant appartenu récemment aux Sucreries de Bourbon ont été repris, restructurés et rétrocédés en lots de 5 hectares par la SAFER (A.3).

En l'absence d'irrigation, les rendements maxima en canne sont de 70 à 90 t/ha (9 à 10 t/ha de sucre). Avec l'irrigation, ces rendements peuvent atteindre 160 t/ha (12 à 13 t/ha de sucre). L'alimentation hydrique est donc dans cette zone le facteur limitant numéro un.

En dehors de la canne, on trouve des parcelles de cultures vivrières, maïs essentiellement, pour l'autoconsommation. Maïs et haricots, tomates, tabac sont souvent cultivés en intercalaires de canne la première année après la replantation ou après une coupe et avant que la canne ne se «referme».

Dans l'ouest, très peu d'exploitations sont mécanisées jusqu'à la récolte (Hauts du Gol, Vue Belle). Seul le chargement mécanique commence à se répandre (groupements de planteurs, CUMA (A.3)).

En dehors du manque d'eau, le deuxième facteur limitant, moins généralisé, est la pente souvent excessive (avec forts risques d'érosion) associée localement à la pierrosité, constitunt ds contraintes importantes à la mécanisation (unité 20 de la carte).

Avec 3 à 5 % de matière organique, un pH de 6 à 6,5, une capacité d'échange de 10 à 15 mé/100 g, un complexe saturé comprenant 0,3 à 0,6 mé/100 g de potassium échangeable et 30 à 110 ppm de phosphore assimilable, les sols bruns présentent une fertilité moyenne à bonne. Lorsqu'ils n'occupent pas des pentes trop fortes et pierreuses, se sont certainement les meilleurs sols de l'île (unité 19 de la carte). Ils présentent malgré tout des carences en phosphore et en potasse qui se corrigent aisément (bonne réponse à la fertilisation, peu de «rétrogradation»). Ces sols ne nécessitent aucun chaulage. L'activité biologique est bonne (spécialement sous canne), la matière organique est bien humifiée (C/N =10) et la nitrification est correcte.

La culture de la canne a «bonifié» les propriétés physiques de ces sols en leur conférant une excellente structure (polyédrique moyenne à fine) sur 30 centimètres, avec une répartition homogène de la matière organique. C'est un atout qu'il faudra conserver.

Les problèmes de gestion de la fertilité, de protection des sols et d'aménagement se posent différemment selon que l'on continue la quasimonoculture de la canne ou que l'on envisage une diversification des cultures et, dans les deux cas, avec ou sans irrigation.

- En canne à sucre

. sur les pentes inférieures à 20 % (unité 19) : il n'y a en principe pas de nécessité d'épierrage. On peut encore parler de «terres franches». Si le parcellaire n'est pas trop petit et s'il est aisément accessible, on est dans la situation favorable où la mécanisation totale n'est techniquement possible que si la pente est inférieure à 12 % (au-dessus, la remorque de la coupeuse ne passe plus). C'est surtout le cas entre Bernica et TroisBassins et dans les Hauts du Gol où les versants à pentes faibles forment des ensembles assez grands. Cette zone possède en irrigué le plus haut potentiel de rendements (biomasse et sucre) de l'île. Ailleurs (entre Bois de Nèfles et Bernica et entre Trois-Bassins et les Avirons), les pentes faibles, minoritaires, n'occupent souvent que des replats de petites tailles délimités par des ravines ; les gros engins auront du mal à y accéder et à manoeuvrer.

Les risques érosifs ne sont importants qu'à l'époque du «dessolage» et de la replantation de la parcelle (tous les 6 à 10 ans) et pendant une partie de l'année qui suit. Lorsqu'ils sont mécanisés (ce qui est de plus en plus fréquent), généralement ces travaux réalisés au tracteur à roues, consistent en un labour ou un disquage lourd en 2 passages, suivi d'un pulvérisage léger puis d'un sillonnage, toujours au tracteur. La plantation proprement dite (dépôt des boutures dans les sillons, avec les engrais, puis recouvrement de terre) peut être également mécanisée et dans'ce cas, associée à la sillonneuse. Mais elle est souvent manuelle. On pratique encore parfois un dessolage au bull (+ ripper + rateau Fléco) sous prétexte qu'il permet, en même temps qu'il arrache et ratisse les vieilles souches, de remonter et d'éliminer quelques roches enterrées à 30-50 cm de profondeur. Sur les sols bruns peu pentus, il n'est généralement pas nécessaire. Il peut l'être sur les pentes fortes à sols plus hétérogènes et présentant de nombreux «fronts de coulées» («reins» ou «caps»).

Tous ces travaux (ainsi que le chargement) sont réalisés grâce à la CUMAPROCANNE de la Saline-Les-Hauts, la seule existante dans l'ouest (en 1990).

Le dessolage ne devrait se faire qu'en saison sèche après la récolte. En l'absence d'irrigation la plantation ne peut pas être réalisée avant l'arrivée des pluies (fin novembre). Or les vierges ne couvrent efficacement le sol que lorsqu'elles atteignent un mètre de haut, soit 4 à 6 mois plus tard. La première saison des pluies sur une parcelle replantée est donc dangereuse. Pour minimiser les risques d'érosion, il est fortement recommandé d'opérer tous les travaux conformément aux courbes de niveau.

L'introduction de l'irrigation permettrait d'avancer la plantation (avant août si possible) de façon à ce que la couverture soit suffisante à la saison des pluies.

Les sols des parcelles intégralement mécanisées auront tendance à se compacter au bout d'un certain nombre d'années, induisant un ralentissement de la pénétration de l'eau (pluies et irrigation) et une diminution d'épaisseur du profil racinaire. Des tests «PROCTOR» effectués à 440 mètres à Stella sur sols bruns (CEEMAT (A.3), 1989), ont montré que ces sols étaient en effet sensibles au compactage. Le CEEMAT (A.3) (1989) a montré l'efficacité d'un décompactage au «paraplow» (décompacteur/sous-soleur) couplé à un enfouissement localisé de fertilisants. Un tel travail profond (30/35 cm), effectué en interlignes après la coupe, a l'avantage de ne pas

bouleverser la surface et, s'il est bien fait, de ne pas abimer les souches.

Il reste à déterminer, les fréquences de décompactage nécessaires, en liaison avec l'irrigation (type de matériel, doses et fréquences) et la mécanisation (nature des engins, fréquences et périodes de passage). Cela pourrait faire l'objet d'un programme de recherches sur les futurs périmètres irrigués de l'ouest.

. sur les pentes supérieures à 20 % (unité 20) : dans ces situations, on cumule souvent les contraintes ; en effet, les pentes fortes et irrégulières coïncident avec les sols les moins profonds, les plus hétérogènes, la présence de cailloux non généralisés mais épars et gênants («reins»), l'existence d'un micro-parcellaire difficile d'accès aux engins, de nombreuses ravines. C'est entre Bois de Nèfles et Bernica d'une pari, TroisBassins et les Avirons d'autre part, que l'on rencontre le plus ces conditions défavorables. Les poches de sols épars sans cailloux, en petits replats relatifs, sont associées en mosaïque avec des zones caillouteuses formant souvent des ressauts.

La mécanisation y est donc très difficile. La récolte mécanique est exclue. Ces conditions difficiles incitent les petits planteurs à faire perdurer leurs plantations bien au-delà de 10 années. Les dessolages se font manuellement (au «croc») ou, parfois encore, par passage d'un bull (D6) équipé à l'arrière de rippers et à l'avant d'un rateau. Le bull travaille en descendant ; il extirpe les roches et les vieilles souches qu'il ratisse et dépose en aindains (souvent avec de la bonne terre) en bordure de parcelle. S'il pleut, le chantier peut subir une érosion catastrophique. Un bon épierrage n'est nécessaire que si le planteur envisage de mécaniser ses travaux de sillonnage/plantation de boutures, ou, à la récolte, le chargement mécanique de ses cannes (impossible de toute façon au-delà de 30 % de pente).

Une autre solution, encore peu utilisée, est le labour chimique au «round-up» après la récolte, suivi de la plantation en travail minimum du sol (sillonnage manuel ou mécanique). L'avantage est de laisser une «couverture morte» protectrice jusqu'à ce que les vierges assurent le relais.

Les difficultés de trouver de la main d'oeuvre et le coût de celle-ci obligent de plus en plus le passage à la mécanisation ; en économie non «assistée», la culture de la canne non irriguée sur les petites plantations morcelées à pentes fortes ne sont pas viables et devraient progressivement disparaître.

- En cultures de «diversification»

Sous irrigation, ce milieu pédo-climatique permet, outre la canne, une large gamme de cultures souvent avec 2 cycles annuels (pour les cycles courts):

- cultures «vivrières» : maïs, haricot, pois..., cultures maraîchères,
- cultures fourragères : Chloris, Bana grass, Pennisetum purpureum, Tripsacum laxum, Brachiaria, Melinis, Setaria... pour les graminées ; Desmodium, Stylosanthes, Centrosema, Pueraria, Glycine... pour les légumineuses (d'installation plus difficile que les graminées),
- cultures florales,
- géranium (problèmes phyto-sanitaires cependant), tabac, ananas,
- arboriculture fruitière : agrumes, papayer, manguier, avocatier, néflier, litchi, vigne de table (programmes IRFAA.3).

A notre avis, les fruitiers devraient prendre une large place en irrigué, l'écologie de l'ouest leur étant spécialement favorable.

Il est important que les techniques et systèmes de cultures, au niveau de chaque exploitation , prennent en compte prioritairement la conservation de la fertilité des terres et leur protection contre l'érosion. Le remplacement éventuel de la canne (protégeant bien le sol) par des cultures annuelles s'accompagnera d'une exposition dangereuse au ruissellement, au décapage en nappe et au ravinement. La bande de sols bruns non ferruginisés constitue dans l'ouest une des zones les plus «sensibles» située à moins de deux kilomètres du littoral (photo A.17), en position dominante de 200 à 400 mètres, et en pentes fortes, elle représente un énorme départ de terre potentiel. En plus de la perte agricole que cela représenterait, la pollution du lagon serait définitive.

Il faudra donc être très vigilant à tous les niveaux (exploitants, encadrement, recherche, administration) aussi bien concernant les pratiques anti-érosives que pour la gestion à l'économie de l'eau d'irrigation.

L'agriculture de cette région devrait s'inspirer des principes généraux suivants :

- Privilégier la présence d'une couverture permanente du sol (morte ou «vivante») sous la culture, avec travail minimum, semis direct, emploi judicieux des herbicides. Ces techniques (à mettre au point par la Recherche et à tester en milieu réel) devraient être obligatoires en cas de cultures d'été sur pentes supérieures à 20 %.
- Si toutefois le sol nécessite des travaux (labours et finitions) assez répétés - en maraîchage par exemple - il ne faudra lui consacrer que les pentes les plus faibles (moins de 10 %) et apporter de fréquents amendements organiques évolués (fumier, compost) pour entretenir le stock organique fragile. En effet, le climat chaud du littoral favorise la minéralisation rapide de ces réserves.
- Favoriser l'embocagement en intégrant l'agroforesterie (espèces utilitaires) dans l'exploitation, tout en la rendant compatible avec le degré de mécanisation souhaité et possible des parcelles.
- Systématiser la création de cordons végétalisés en courbes de niveau d'environ 3 mètres de dénivelée.
- Toujours assurer le captage, le cheminement et l'évacuation des eaux de ruissellement. Prévoir pour cela des fossés de diversion transversaux (pente 2 environ) en amont immédiat des cordons végétalisés, raccordés aux talwegs naturels. Tous les chemins de l'eau doivent être entretenus et enherbés sur leurs bordures.
- Eviter au maximum les «gros chantiers», c'est-à-dire :

  - les dessolages et défrichements au bull-dozer risquant trop souvent d'être faits dans de mauvaises conditions. Préférer, au-delà de 20 % de pente, les travaux manuels, plus progressifs et non agressifs, qu'il faudrait encourager en les subventionnant.
  - les épierrages systématiques et répétés qui déstructurent et fragilisent les sols. L'épierrage moyen et fin n'est pas nécessaire sur pentes supérieures à 20 % de toute façon peu mécanisables. Les cailloux ont un rôle bénéfique en ralentissant et «étalant» le ruissellement.
  - les rectifications importantes de modelés, avec remaniement de terre, par raclages, comblements et creusements. La D.R.S. «lourde» de ce type ne nous paraît pas adaptée au contexte foncier et physique de cette région petite taille et morcellement des exploitations, pentes très irrégulières, ravines nombreuses, sols relativement peu épais. D'autre part, elle est non seulement très coûteuse, mais aussi dangereuse quand elle n'est pas parfaitement exécutée puis entretenue.

- ne jamais faire de cultures annuelles au-dessus de 30 % de pente. Y laisser une couverture permanente (boisement ou embroussaillement naturels), éventuellement arboriculture plantée au trou, à sols enherbés, n'exigeant pas de mécanisation au tracteur.

  es sols caractérisent les pentes supérieures à 10 %, entre la mer et 300 mètres d'altitude (Fig. 6.9). Dans cette frange d'altitude, quand la pente est inférieure à 10 %, on passe aux sols vertiques (voir plus loin, unités 25 et 26). Ces zones, à sols peu épais et caillouteux, représentent 2 600 hectares. Elles sont arrosées par 650 à 1 000 mm de pluies annuelles. La saison sèche y est très marquée, avec 6 mois à moins de 50 mm. Il n'y a généralement pas de cultures strictement pluviales (maïs, localement entre 200 et 300 mètres d'altitude) ; la végétation est une savane graminéenne à *Heteropogon contortus* (piquant jaune) et *Bothriochloa pertusa* ; parfois, *Themeda triandra* (piquant rouge) et *Panicum maximum* (fataque) indiquent des zones à régime hydrique plus favorables sur d'anciennes jachères. Les espèces ligneuses secondaires forment des boisements, parfois denses, à *Leucaena leucocephala* (cassi), *Albizia lebbeck* (Bois noir), *Furcraea foetida* (choca vert ou «agave»), et *Pithecellobium dulce* (tamarin de l'Inde). Sont absents systématiquement de ces zones, alors qu'on les trouve sur sols vertiques, des épineux tels *Acacia farnesiana* (zazacia) et *Prosopis juliflora* (zépinard). Ceci est un excellent critère de différenciation entre sols vertiques et sols bruns non vertiques.

6.4.4 Les sols bruns ferruginisés (unités 21, 22, 23)

Les classes de pentes permettent de différencier 3 unités d'inégales valeurs dans ce grand ensemble des sols bruns ferruginisés.

- les pentes modérées, comprises entre 10 et 20 % (unité 21),
- les pentes fortes, comprises entre 20 et 30 % (unité 22),
- les pentes très fortes, supérieures à 30 % (unité 23).

Mais, avant d'aborder séparément ces versants, souvent associés en étagements, voyons ce qui leur est commun, des points de vue de la mise en place et de la nature des matériaux et des sols, dont seules varieront les épaisseurs et la pierrosité :

- les matériaux superficiels sont composés de «colluvions de transit», riches en cailloux et blocs plus ou moins altérés de toutes tailles (y compris des dalles disloquées et basculées), emballés dans une matrice terreuse (halloysitique) brun rougeâtre (7,5 YR 4/4 à 5 YR 4/4, en humide). Cette couche présente une épaisseur variable, de 30 à 100 cm. La couleur est d'autant plus vive et l'épaisseur plus faible, que la pente est forte, ce qui est en relation, d'une part avec un drainage et un dessèchement plus rapides, d'autre part avec un décapage plus accentué. Les teneurs et tailles des éléments grossiers sont extrêmement variables, ceci étant une caractéristique propre à ces unités de milieu. Cependant, pour une classe de pentes donnée, il existe des gradients de «pierrosité» et d'épaisseur de la couche colluviale, le premier augmentant, le second diminuant, lorsqu'on se rapproche de la mer. Ils sont en rapport direct avec le gradient pluviométrique qui diminue en même temps que l'altitude (environ 100 mm de moins par an par 100 mètres de dénivellation), donc avec l'atténuation de l'intensité de l'altération et l'augmentation de l'érosivité du milieu. Il s'ensuit que plus on se rapproche de la mer, plus la densité de blocs rocheux résiduels est importante.
- en dessous de la couche colluviale, après un contact très net, se trouve l'altération en place, plus compacte, des mugéarites, de teinte d'ensemble

beige grisâtre (rougeâtre dans les fissures argilifiées, noirâtre pour les boules inaltérées résiduelles de toutes tailles). Lorsque l'érosion les libère de leur auréole d'altération en écailles, en évacuant celle-ci, ces blocs restent en place et s'accumulent de façon relative en surface, ou bien s'incorporent aux colluvions de transit.

En profondeur, on ne voit jamais la dalle rocheuse continue saine (contrairement aux replats à sols vertiques), de sorte que, malgré l'érosion qui a affecté ces zones, l'altération a continué à progresser entre les «gratons» et les fissures des dalles propices à la pénétration de l'eau.

Les versants à pentes supérieures à 10 % ne montrent donc pas de dalles affleurantes de grande étendue. Cependant, les affleurements en gros blocs basculés sont nombreux. Ils présentent dans le paysage des formes linéaires souvent conformes aux lignes de niveaux ; ils sont alors révélés par des ruptures de pentes et ressauts généralement boisés de façon plus dense (Schinus terebenthifolius (.) Ces ressauts et chicots correspondent à des bourrelets ou fronts de coulées, disloqués en gros blocs pouvant atteindre chacun plusieurs mètres cubes. Ces chaos stockent entre leurs fissures des réserves hydriques plus abondantes qu'ailleurs, et mises à profit par les arbres, qui y prennent un plus fort développement. Ces zones rocheuses sont plus abondantes quand on se rapproche du littoral ; elles déprécient de plus en plus fortement la valeur agricole des unités.

Les sols résultent de l'activité morphodynamique sur les versants, où alternent, sur de faibles distances et sans lois de répartition discernables à cette échelle, les termes de la trilogie «décapage-transit-accumulation», aboutissant à la couche colluviale d'épaisseur et de pierrosité très variable. Contrairement à ce qui se passe en milieu plus humide, l'érosion est ici du type décapage en nappe et non glissement en masse des altérites. L'érosion en nappe remanie et redistribue en aval l'altération en place des mugéarites. On trouve donc en surface une couche allochtone meuble, bien structurée, de 30 à 100 cm d'épaisseur, sur un substrat d'altération autochtone

des coulées, traversé par des veines rougeâtre d'argilification. La partie supérieure remaniée constitue le «sol agricole» proprement dit.

- l'horizon «A», de 20 cm d'épaisseur, est brun très foncé (7,5 YR 3/2 à l'état humide) ; il possède une structure grenue à polyédrique très fine et friable avec enracinement graminéen dense.

Ses caractères analytiques sont en moyenne les suivants : environ 20 d'éléments grossiers de roche altérée grisâtre. Matrice à texture argileuse 50 % d'argile, 37 % de limons, 13 % de sables. Matière organique = 5 à 6 % ; azote total = 2,2 ; C/N = 12, pH (eau) = 6,6 ; CEC = 17 mé/100 g dont Ca = 11 mé, Mg = 6 mé (Mg/Ca = 0,5), K = 0,3 mé, Na = 0,3 mé ; saturation = 100 % ; phosphore assimilable = 80 ppm ; phosphore totall = 1 200 ppm. - l'horizon «B» (colluvial), de 20 à 80 cm d'épaisseur, est brun rougeâtre (5YR 4/4 à l'état humide), friable, à structure polyédrique moyenne fragile, à nombreuses racines. Ses caractères analytiques sont les suivants : 20 à 30 % de pierrosité, matrice de densité apparente 1,4, à texture très argileuse : 53 % d'argile, 35 % de limons, 12 % de sables. Taux de matière organique = 1,1 %, azote total = 0,6 , C/N = 12, pH (eau) = 6,9, CEC = 12 mé/100 g dont Ca = 7,5 mé, Mg = 4,5 mé (Mg/Ca = 0,7), K = 0,02 mé, Na = 0,7 mé ; saturation = 95 % ; phosphore assimilable = 30 ppm ; phosphore total = 800 ppm.

- l'horizon d'altération (autochtone) commence vers 40/100 cm de profondeur ; il est nettement plus compact. On y voit des poches, veines et auréoles rougeâtres argileuses bien structurées (avec quelques racines) parcourant la roche en cours d'altération, de teinte gris clair.

Les sols bruns ferruginisés sont assez filtrants, avec une perméabilité (Muntz) à saturation de l'ordre de 50 mm/h. Suivant leur épaisseur, leur réserve en eau utile varie de 50 à 80 mm. Ce sont des sols qui, du point de vue fertilité physico-chimique, sont intéressants, mais qui sont souvent dévalués par leurs pentes élevées, leur forte érodibilité, leur extrême hétérogénéité, leur profondeur assez faible, leur pierrosité excessive. Nous les avons subdivisés en 3 grandes classes de pentes

a) Les sols à pentes générales modérées (unité 21)

avec des pentes comprises entre 10 et 20 %, ils caractérisent les secteurs les plus intéressants (au total environ 500 hectares) ; leur profondeur «utile» (exploitable par les racines) peut atteindre 80 cm (soit environ 80 mm de réserve en eau utile). Ces zones devront impérativement être protégées contre l'érosion en nappe ravinante : tout d'abord éviter les déroctages systématiques et l'andainage des blocs dans le sens de la pente ; éviter un épierrage excessif de la surface car les cailloux ont un rôle positif en faisant diversion au ruissellement ; pour les défrichements, préférer le travail manuel au bull trop brutal ; ne pas laisser la surface défrichée à nu avant l'arrivée des grosses pluies (photo A.20) ; ne pas toucher aux abords des gouttières de ruissellement qui seront les premières zones à se raviner et qui mordront ensuite de façon régressive sur les bonnes zones.

En culture mécanisée (les pentes le permettent), les pratiques culturales et d'aménagement devront être très soignées. Les cultures annuelles, qui obligent souvent à découvrir dangereusement le sol, ne sont pas à conseiller dans ces zones très sensibles. La canne à sucre en irrigué donnerait d'excellents résultats sur ces sols. Nous pensons cependant que leur véritable aptitude est l'arboriculture fruitière irriguée, qui s'accommode parfaitement bien de sols pierreux à drainage correct et dont l'enracinement peut exploiter les poches de la zone d'altération profonde. Les lignes d'arbres plantés «au trou», le long des courbes de niveau et alternés avec des bandes herbacées (protégées des feux) ou des andains de pierres, des chenaux de diversion bien entretenus, nous paraissent une bonne façon de conserver le sol.

Beaucoup de replats intéressants de cette unité 21 sont déjà lotis ou en cours de lotissement ; les zones encore utilisables pour l'agriculture sont situées, d'une part en contrebas de Saint-Gilles-Les-Hauts et de la Saline-Les-Hauts, d'autre part, en dessous de Stella/Piton Saint-Leu. Ces terres étaient autrefois très cultivées. Les archives indiquent qu'au XVIIIème et XIXème siècle, beaucoup de cultures, dont certaines réputées comme très érosives, y ont été, en fonction des circonstances, pratiquées, entre autres : canne à sucre, coton, sisal, manioc, blé, maïs, arbres fruitiers, légumes. Tout cela à favorisé l'érosion, surtout lors des périodes cycloniques qui balayaient plantes et sols.

b) Les sols à pentes générales fortes (unité 22)

Cet ensemble, à pentes comprises entre 20 et 30 %, est le plus important, puisqu'il représente 1 600 hectares, soit 62 % du secteur des sols bruns ferruginisés. Il compose une bonne partie du «front montagneux boisé» (Leucaena, Pithecellobium) qui, entre la Rivière des Galets au nord et Piton Saint-Leu au sud, domine la «bande» littorale à sols vertiques et affleurements de coulées. Cette ligne de reliefs relativement continue mais parfois dédoublée et avec de multiples petits replats, a une origine probablement tectonique (photo A.17) ; elle serait due au glissement d'ensemble en fin de phase Il des bas-flancs du panneau occidental du volcan-bouclier. Cette cicatrice d'effondrement a été moulée ensuite, et donc atténuée, par les laves différenciées des phases III et IV. Les versants sont donc conformes aux pendages de ces coulées.

Par rapport à l'unité précédente, les sols sont ici moins épais (30 à 60 cm) et plus blocailleux. Les blocs anguleux jalonnent des fronts et bordures de coulées qui forment des ressauts. Sous les blocs cependant, l'altération se poursuit et la dalle lisse n'est jamais affleurante.

La pente forte et la pierrosité importante excluent les cultures demandant d'importants travaux de mécanisation ou découvrant dangereusement le sol (cultures annuelles). L'épierrage systématique n'est pas envisageable sur ce type de milieu pour des raisons de coût autant que de prudence antiérosive. Les éléments grossiers ont leur rôle dans la stabilité relative de la couche colluviale supérieure, qui constitue la partie la plus intéressante du sol : en surface, opérant de multiples diversions du ruissellement, ils répartissent celui-ci et évitent sa trop rapide concentration ; dans le sol, par leurs interfaces, ils favorisent l'infiltration de l'eau et son stockage en profondeur, dans les poches d'argilification plus avancée de l'altérite en place. La pierrosité a donc un rôle essentiel et favorable non seulement sur le ralentissement du décapage des sols, mais sur l'hydrodynamique et la constitution de réserves, tamponnant ainsi, dans une certaine mesure, la sécheresse climatique. Cette «plus-value» apportée par la pierrosité, est mise en évidence, en tout cas pour la végétation ligneuse, au niveau des lignes d'épierrage anciennes et des fronts de coulée disloquée : à ces endroits les arbres sont les plus hauts et les plus denses (à l'effet précédent s'ajoute en plus ici un effet «mulch en grand» qui limite efficacement l'évaporation).

Ces considérations nous amènent à penser que seule l'arboriculture fruitière peu mécanisée est envisageable sur de tels versants. Les arbres fruitiers valorisent généralement bien les sols caillouteux (qui facilitent la descente des racines) et à bon drainage naturel. En plantation mécanisée, seuls méritent d'être mis en valeur, les versants faciles d'accès, d'une étendue suffisante (le morcellement étant ici un fort handicap) ou susceptibles d'être associés (acquérant ainsi une «plus-value») à des zones à pentes faibles à sols comparables, constituant ainsi des blocs de grande taille.

L'aménagement sera réduit au minimum : création de pistes d'exploitation et de récolte relativement rapprochées, le long des courbes de niveau. Epierrage réduit aux lignes de plantation (par trouaison). Il faudra veiller à ce que les travaux préalables aux plantations (défrichement en particulier) ne soient pas trop brutaux pour les sols sous peine d'une érosion accélérée. Le type d'irrigation qui convient le mieux sur de telles pentes est l'irrigation localisée. Les espèces fruitières envisageables sont nombreuses : agrumes, manguiers, anacardiers, avocatiers, papayers. Le degré de mécanisation possible (fertilisation, traitements, entretien, récolte), lié aux conditions économiques sociales et techniques, devra être particulièrement étudié, en fonction du type de spéculation envisagé (espèces fruitières, petits vergers ou grands périmètres, marché local ou exportation, fruits frais ou produits transformés...). Il est certain que dans le contexte réunionnais, la rentabilité économique et la compétitivité de l'arboriculture sur ces versants «difficiles» restent très problématiques.

c) Les sols à pentes générales très fortes (unité 23)

Les secteurs à reliefs très accidentés (environ 500 hectares), dont les pentes dépassent 30 %, forment deux fronts principaux parallèles au rivage d'une part au-dessus de l'Etang de Saint-Paul (photo A.14), représentant un glissement morpho-tectonique formant une ancienne falaise littorale à pentes dépassant souvent 40 % ; d'autre part, sur une largeur de 9 kilomètres et à 2 kilomètres du littoral, entre la ravine de l'Ermitage et la Petite Ravine. Cette dernière ligne de relief, globalement concave vers la mer, comme au-dessus de Saint-Paul, a probablement aussi une origine tectonique (photo A.17).

Les très fortes pentes (photo A.19) sont couvertes de fourrés denses à base de Leucaena glauca et Pithecellobium dulce. Il est évident qu'elles doivent être laissées en couverture ligneuse permanente de protection.

6.4.5 Les vertisols et affleurements de coulées (unités 25 et 26)

Les types de milieu à pédogenèse vertique caractérisent, sur environ 1 000 hectares (entre La Possession et Les Avirons), les secteurs à faibles pentes (en dessous de 10 %) du littoral (Fig. 6.9).

lis sont généralement localisés aux extrémités des planèzes de la phase IV, en contrebas des fronts montagneux d'origine tectonique (fin de phase II) et situés en dessous de 100 mètres d'altitude. Font exception les planèzes perchées jusqu'à 300 mètres d'altitude, situées en amont du massif des tufs de Saint-Gilles, ces reliefs ayant fait obstacle au déversement littoral des coulées, qui se sont ainsi accumulées à l'arrière en s'épaississant.

La pluviométrie annuelle est la plus faible de l'île (550 à 800 mm). La saison sèche y est également la plus accentuée, avec 6 à 7 mois à moins de 50 mm de pluie. La température moyenne annuelle y est de 23 à 25 ° C. Toutes les conditions «lit ho-morpho-climatiques» sont donc réunies pour permettre, sur les replats de roches basiques, la néoformation d'argiles gonflantes (montmorillonites) caractéristiques des verlisols.

De loin ou vues en altitude, les planèzes littorales peuvent présenter des profils réguliers, sub-horizontaux (photo A.17). En réalité, le modelé de détail de ces «pseudo-glacis» n'est pas si régulier. La pente générale faible est coupée d'assez nombreux petits versants de 10 à 20 % de pente (qui n'ont pas pu être représentés sur la carte) où les sols peu épais perdent leur caractères vertiques, pour se rapprocher des sols bruns ferruginisés. Ces ondulations, ressauts et courts versants sont toujours «structuraux» (conformes aux pendages des basaltes) et révèlent une topographie antérieure (irrégularités de la tectonique en gradins ?) moulée et estompée par les nappes de basalte de la phase IV.

- La végétation

La végétation des vertisols et affleurements rocheux associés est une savane graminéenne brûlant tous les ans, arbustive (région de Saint-Gilles) ou non. La strate herbacée, plus ou moins dense et couvrante suivant l'épaisseur du sol, est à base de graminées vivaces (photo A.18) Heteropogon contortus (piquant jaune), Bothriochloa pertusa (foin). Une graminée annuelle, Aristida depressa (piquant blanc), forme en saison sèche des plages blanches, reconnaissables de loin, au sein de la savane jaune des vivaces.

La strate arbustive (inférieure à 4 mètres de haut) ne s'observe que dans la région de Saint-Gilles (Plateau Carrosse) ; elle a complètement disparu ailleurs, probablement sous l'action conjuguée des chèvres, des feux, des vents (alizés plus actifs, à embruns salés) et des coupes de bois. Au Plateau Carrosse, on y voit les espèces suivantes :

- espèces caractéristiques : Acacia farnesiana (zacacia) et Prosopis juliflora (zacacia zépinard ou Algaroba) Ce dernier peut former des fourrés circulaires impénétrables semblant progresser rapidement (espèce introduite vers 1.950).
- espèces semi-caractéristiques (présentes sur les vertisols plus qu'ailleurs) : Pithecellobium dulce (tamarin de l'Inde).
- espèces ubiquistes : Schinus terebenthifolius (encens) ; les grandes hampes de sisal et autres agaves Furcraea (choca bleu, «choca cader», «choca baïonnette») sont fréquentes partout.

Les espèces que l'on ne trouve jamais, étant «allergiques» aux vertisols, mais que l'on peut trouver à proximité dès que la pente augmente et que l'on passe aux sols bruns sont : Leucaena glauca (cassi), Albizia lebbeck (bois noir), Tamarindus indica (Tamarin des bas), Litsea chinensis (avocat marron).

L'absence ou la présence ainsi que la densité de certaines espèces peuvent donc être d'assez bons indicateurs

pour différencier les sols vertiques des sols bruns non vertiques.

- Les sols Les vertisols (photo A.25) présentent «le profil type» suivant, développé sur matériau colluvionné d'environ 40 cm de profondeur, puis sur l'altération en place:
- L'horizon de surface (0-15 cm) est de couleur grise très foncée (10 YR 3/1 à l'état humide) ; il présente une structure fine (grenue à l'état sec, grumeleuse et foisonnante à l'état humide) particulièrement bien developpée, densément exploitée et entretenue par un enracinement graminéen dense. La présence de nombreux cailloutis indique que nous sommes ici, comme pour l'horizon inférieur, sur un colluvium.

Les caractéristiques analytiques sont les suivantes : texture argileuse (45 d'argile, 37 % de limons, 17 % de sables); densité apparente = 1,2 ; taux de matière organique = 4 %, azote total = 1,7 ,, (C/N = 15) ; pH (eau) = 7 ; CEC = 23 mé/100 g dont Ca = 12 mé, Mg = 11 mé, K= 0,4 mé, Na = 0,5 mé; saturation = 100 % ; phosphore assimilable = 50 ppm ; phosphore total = 2000 ppm.

- de 15 à 40 cm de profondeur se trouve toujours le «colluvium» argilo caillouteux dont la matrice est de teinte brun foncé (10 YR 3/3 en humide) à brun-jaunâtre foncé (10 YR 3/4). La proportion de cailloux y est très variable, en moyenne de 30 %, de toutes grosseurs (5 à 30 cm). La structure est polyédrique anguleuse moyenne à grossière.
  Dans la matrice, cet horizon présente une texture très fine (54 % d'argile, 31 % de limons, 15 % de sables) et une densité apparente de 1,3 ; le taux de matière organique est de l'ordre de 2 %; azote total = 0,75 . (C/N = 13) ; pH (eau) = 7,1 ; CEC = 22 mé/100 g, Ca = 11 mé, Mg = 12 mé, K = 0,09 mé, Na = 1,2 mé ; saturation = 100 % ; phosphore assimilable = 50 ppm ; phosphore total = 1 500 ppm.
- de 40 à 80 cm de profondeur, après une discontinuité nette avec le matériau colluvial supérieur, les propriétés physiques changent assez nettement : la couleur est brun foncé (10 YR 3/3) parfois olivâtre, mais la texture semble devenir plus fine et plus «lourde» (forte densité apparente). Le matériau reste légèrement humide en saison sèche, du moins dans sa moitié inférieure ; on y voit alors de larges «faces de glissement» luisantes et obliques. Par dessèchement, s'ouvrent de larges fissures verticales (1 à 2.cm de large au sommet de l'horizon) délimitant des prismes à arêtes aigues. Ce matériau vertique est beaucoup moins riche en éléments grossiers que le colluvium supérieur. Des amas calcaires, blancs et friables, ont été observés à la base de certains profils.
  Les caractères analytiques de ce matériau sont les suivants : texture extrêmement argileuse (70 % d'argile, 19 % de limons, 11 % de sables) ; densité apparente = 2,1 ; pH (eau) = 7 à 7,5 ; CEC = 33 mé/100 g ; Ca= 7,5 mé ; Mg = 16 mé ; K = 0,07 mé ; Na = 4,7 mé ; saturation = 100 %.
- En dessous de 80 cm de profondeur, on passe souvent brusquement à la dalle basaltique inaltérée. Il n'y a pratiquement pas de «zone d'altération» faisant transition (en tout cas elle est inférieure à 10 cm).
  Ces sols ont toujours des pH voisins de 7 (parfois supérieurs). Leur complexe absorbant est saturé ; en profondeur, on y remarque de fortes proportions de magnésium et de sodium qui témoignent d'une forte influence des embruns marins. Ceux-ci, imprégnant les sols du littoral, sont lessivés en profondeur où les cations se fixent sur le complexe adsorbant.

Variations autour du profil et pédogenèse :

- L'épaisseur et la pierrosité du matériau coltuvial supérieur sont très variables (20 à 60 cm pour l'épaisseur, 10 à 50 % pour la pierrosité).
- La profondeur de la dalle c'est-à-dire l'épaisseur totale du sol, est comprise entre 30 et 130 cm.
- L'existence ou non d'amas calcaires en profondeur

En fait, ce qui caractérise aussi ce milieu et qui est important pour l'aménagement (autant que la nature du sol) c'est la disposition, la répartition et la taille des unités élémentaires, ainsi que la fréquence d'affleurements rocheux associés (photo A.18).

Ces «pseudo-glacis» ont subi dans le passé un décapage généralisé, de sorte que les sols ne subsistent que dans les «poches» irrégulières situées entre les affleurements qui les protègent de l'action érosive actuelle. Il s'agit vraisemblablement des racines les plus profondes et les mieux «ancrées» de la zone d'altération d'une couverture pédologique plus ancienne et ayant été déblayée. Ces «poches» d'altération, protégées et confinées, donc riches en minéraux calco-alcalins et à régime hydrique très contrasté, ont servi de «creuset» sous le climat actuel à la néoformation d'argiles montmorillonitiques ayant conduit à la formation des vertisois. Ces poches de vertisols sont extrêmement sinueuses et souvent de petite taille ; elles sont associées de façon inextricable avec les affleurements en dalles. D'ailleurs, les unités que nous avons cartographiées ne sont généralement pas composées à 100 % de vertisols ; ce sont les plages où ils dominent à plus de 50 %. Inversement les zones cartographiées «affleurements» (unité 26) sont associées à de petites poches de vertisols, représentant au total moins de 50 % de leur superficie totale.

Les affleurements associés sont situés au ras du sol, y formant des dalles plus ou moins grandes et continues, c'est pourquoi il est difficile de les repérer toutes sur les photographies aériennes.

Nous avons essayé vainement de trouver des lois de répartition pouvant commander une quelconque structure spatiale des poches de vertisols. Dans notre hypothèse précédente cela revient à rechercher comment se répartissent les racines les plus profondes des altérites anciennes ayant évolué en vertisols. Or ceci est forcément commandé par la lithologie différentielle (parties massives ou scoriacées des coulées), la densité de fissuration de la roche, les types d'écoulement et de superposition des coulées, leur viscosité et leur vitesse de refroidissement (liée à la cristallisation donc à l'altérabilité). Tout cela est donc extrêmement complexe et explique l'absence de lois de répartition simples des vertisols.

Aptitudes

En eux-mêmes, les vertisols sont sources de contraintes «classiques» gonflement, engorgement, très faible macro-porosité, imperméabilité totale en hivernage, mouvements internes néfastes à certains enracinements (mais peu à ceux des graminées), difficultés de travail du sol et d'accessibilité.

Cependant les vertisols de la Réunion, sont des vertisols «grumosoliques» c'est à dire à structure grenue très développée dans l'horizon superficiel («self mulch») ; c'est une propriété favorable (que n'ont pas tous les verlisols) qui facilite la germination et qui limite et retarde le dessèchement du sous-sol.

Le deuxième ensemble de contraintes tient, nous l'avons vu, à l'extrême hétérogénéité spatiale et la dispersion des plages à vertisols, particulièrement de leur intrication complexe avec de très nombreux affleurements de dalles. En général, il s'agit d'affleurements bien «enracinés» c'est à dire pratiquement indéroctables au «bull», contrairement aux affleurements des sols bruns, où la dalle disloquée alterne avec du matériau d'altération des joints horizontaux et fissures obliques qui, une fois dégagé des blocs le recouvrant, est alors utilisable comme terre agricole. Dans les glacis à vertisols, ce n'est pas le cas ; il s'agit donc d'affleurements «absolus», totalement rédhibitoires. Le déroctage par soulèvement de la dalle y met rarement à jour un matériau argileux d'altération utilisable.

Cette unité de milieu (unité 25, environ 700 h) a donc dans son ensemble un faible potentiel agricole. Les vertisols se prêtent mal à l'arboriculture fruitière en général, spécialement aux agrumes, au cocotier et à l'avocatier. Le manguier, l'anacardier et le jujubier sont les rares espèces susceptibles de s'adapter. Le jojoba, arbuste oléagineux très peu exigeant, mériterait peut être d'être essayé. Naturellement nous n'aborderons pas ici le contexte socio-économique.

Sur ces types de sols, l'irrigation localisée à très faible débit est fortement recommandée sous peine de gaspillages importants et d'engorgement néfaste. La perméabilité à saturation (Muntz) est souvent inférieure à 1 mm/h. On peut compter sur 80 mm de réserve utile en eau sur ces sols, d'épaisseur moyenne exploitable de 70 cm.

Les cultures fourragères pérennes, résistantes à la sécheresse ou irriguées peuvent se concevoir, afin d'améliorer les conditions d'élevage du littoral ouest. Nous ne conseillons cependant pas l'introduction du Leucaena sur les vertisols, les peuplements naturels les évitant systématiquement. Un des problèmes pratiques de cette zone sera

de contrôler les feux de brousse ainsi que le «pacage sauvage» des chèvres et bovins. A l'heure actuelle toute cette bande littorale brûle en saison sèche et la dégradation de la végétation résiduelle par le bétail est générale.

Une dernière contrainte à mentionner est l'action néfaste des embruns salés sur nombre de cultures (maraîchage, arboriculture...). Les plantations de brise-vents seront nécessaires dans les zones les plus exposées (de l'Ermitage aux Avirons). L'unité 26, caractérisée par une dominance d'affleurements rocheux indéroctables avec seulement de rares poches de vertisols, se localise, du nord au sud :

- en contre bas de la «falaise» de Saint-Paul, en bordure de l'étang,
- entre la ravine des Trois-Bassins et la Petite Ravine,
- sur la frange d'extrême littoral, entre la Pointe-au-Sel et les sables d'Etang-Salé.

Ces zones, d'environ 350 hectares, sont irrécupérables pour l'agriculture.

6.5 Les pyroclastites, tufs et cendres; de la phase V (unités 27 à 39) Caractéristiques générales

6.5.1 Etendue

Les pyroclastites terminales du Piton des Neiges, datées entre 40 000 et 15 000 ans, ont saupoudré l'ensemble du massif ainsi que le panneau sudouest de la Fournaise. Le manteau de cendres peut avoir une épaisseur de plusieurs mètres (photo A.36). Il a cependant été décapé.par l'érosion sur les planèzes littorales (Fig. 6.10) : dans l'ouest, sur les coulées des phases III et IV, c'est la morphodynamique essentiellement de surface (érosion en nappe et ravinante) qui l'a fait disparaître en dessous de 400 mètres d'altitude ; dans la zone au vent (nord-nord-est), c'est plutôt la morphodynamique de glissements des altérites des coulées sous-jacentes qui l'a éliminé (ou fortement remanié), en dessous de 150 mètres. De même, sur les massifs montagneux déjà disséqués de la phase II, les cendres ont été rapidement éliminées. Les cirques et les ravines, de creusement récent, postérieurs aux pyrociastites, n'en montrent pas trace. Enfin, ont été en grande partie décapées, les cendres des zones de haute altitude (supérieure à 1 800 mètres) où la maigre végétation éricoïde n'a pu permettre leur maintien. Les coulées de phase VI du Piton des Neiges (hauts de Saint-André et de Bras Panon) sont également postérieures aux pyroclastites et elles les recouvrent (Chapitre I).

A l'heure actuelle, on peut estimer à 42 000 hectares, la superficie des planèzes encore couvertes par les cendres et tufs issus du Piton des Neiges, d'une épaisseur supérieure à 1 mètre, donc affectées par la pédogenèse andique.

6.5.2 Caractéristiques des dépôts

Lorsque la pédogenèse argilifiante (sols bruns andiques) et le remaniement par glissements ne l'ont pas trop affecté, le manteau cendreux qui moule la topographie bosselée des coulées antérieures, montre un litage caractéristique des dépôts aériens successifs : les couches, parallèles à la topographie d'origine (photo A.36), ont des épaisseurs de 10 à 50 cm. Cette différenciation est actuellement renforcée par la pédogenèse andique (ou podzolique) différentielle qui affecte séparément chaque lit, en fonction de son comportement physique (granulométrie, compacité, porosité...) lui-même résultant de ses conditions de dépôt. On observe ainsi des lits de teintes différentes : brune, chocolat, beige, gris clair, gris noirâtre ou rougeâtre ; les uns (la plupart) sont meubles et thixotropes, d'aspect limoneux ; les autres, plus soudés, sont compacts et granuleux se rapprochant des tufs. Sur les tranchées qui ont été soumises à une dessiccation artificielle on observe aussi un renforcement des différences les lits meubles de teinte brun foncé, brun noirâtre ou rouille montrent une desquamation fine superficielle en «plaquettes» polygonales caractéristiques, à déshydratation irréversible ; à l'inverse les lits plus

compacts et plus clairs conservent une structure massive. Certains lits montrent une individualisation de petites concrétions gibbsitiques crème.

Toutes ces différences résultent de processus pédogénétiques et géochimiques qui ont affecté de façon plus ou moins intense chaque lit de pyroclastites après son dépôt.

La circulation différentielle des eaux d'infiltration, contrariée par le litage subhorizontal qui lui donne parfois une forte composante latérale, engendre des processus de néoformations minérales, de lessivage et d'accumulation affectant la silice, les hydroxydes de fer, l'alumine et la matière organique (chélates, acides fulviques). Ce sont les processus d'andosolisation, combinés en altitude à la podzolisation. Les niveaux tuffeux, les plus consolidés lors de leurs dépôts, peut-être d'origine phréatomagmatique, sont les moins affectés par la pédogenèse car l'eau y pénètre plus difficilement (photo A.36).

Dans l'ensemble, les pyrociastites du Piton des Neiges, à l'inverse de celles de la Fournaise qui sont de nature basaltique, sont à tendance trachytique, avec des teneurs initiales en silice assez élevées (de l'ordre de 60 % de SiO_2). Les tufs sont actuellement peu désilicifiés alors que les cendres (qui forment la majorité des dépôts) ont subi une rapide perte de silice ; elles ne possèdent plus que 30 à 40 % de SiO_2 ; cette silice est actuellement recombinée dans les produits amorphes de néoformation (allophane, imogolite). L'alumine ne part pas : elle subit essentiellement des redistributions dans les 2 premiers mètres, par complexation avec la matière organique. Lorsqu'elle est en excès par rapport aux allophanes elle peut s'individualiser dans certains lits plus lessivés en silice sous la forme de gibbsite visible sur les tranchées desséchées en petits amas caverneux durcis de couleur blanc crème.

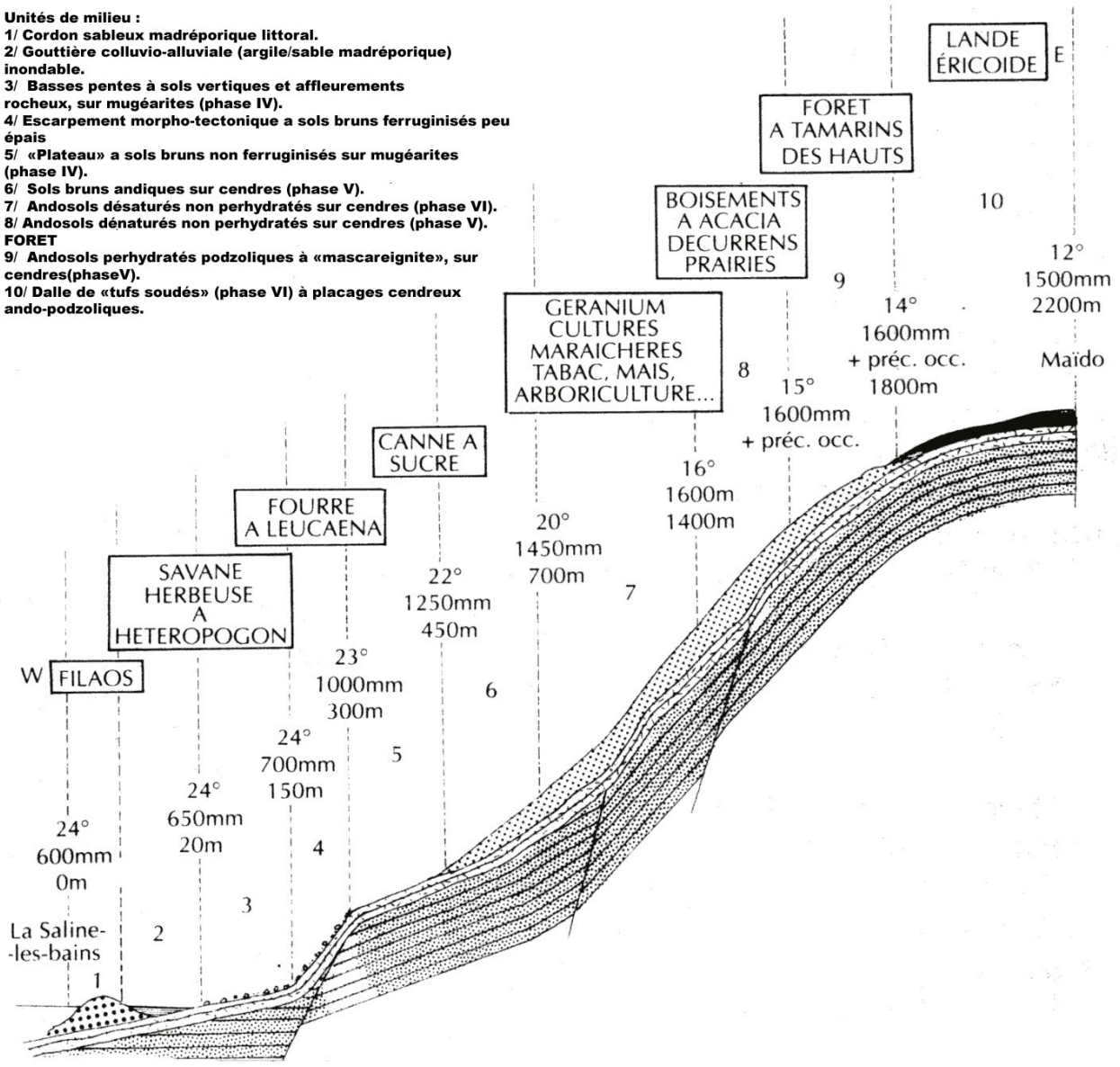
6.5.3 Zonation pédo-génétique : climato-séquence

En dehors des tufs sub-affleurants à sols bruns très peu épais (unité 27) qui forment quelques placages résiduels dans les zones sèches de l'ouest, la répartition des sols à caractères andiques sur pyroclastites épaisses, cendres essentiellement, obéit aux gradients pluviométrique et thermique, donc altitudinal (Fig. 6.9 et 6.10)

Unités de milieu :

1. Cordon sableux madréporique littoral.
2. Gouttière colluvio-alluviale (argile/sable madréporique) inondable.
3. Basses pentes à sols vertiques et affleurements rocheux, sur mugéarites (phase IV).
4. Escarpement morpho-tectonique a sols bruns ferruginisés peu épais
5. «Plateau» a sols bruns non ferruginisés sur mugéarites (phase IV).
6. Sols bruns andiques sur cendres (phase V).
7. Andosols désaturés non perhydratés sur cendres (phase VI).
8. Andosols dénaturés non perhydratés sur cendres (phase V). FORET
9. Andosols perhydratés podzoliques à «mascareignite», sur cendres(phaseV).
10. Dalle de «tufs soudés» (phase VI) à placages cendreux ando-podzoliques.

FIG. 6.9 – *Toposéquence de paysages sur le versant ouest entre La-Saine-Les-Bains et Piton Maido*



(.jpg)

- Sols bruns andiques (unités 27 et 29)

Formés sur cendres, souvent remaniés par colluvionnement, on les trouve dans les conditions suivantes : 1 200 à 1 500 mm de pluies annuelles, 5 à 6 mois à moins de 100 mm, 20 à 22 ° C de température moyenne annuelle ; altitude comprise entre 450 et 700 mètres. Localisation «sous le vent». Superficie : environ 7 000 hectares.

- Sols faiblement ferrallitiques andiques (unités 30 et 31)

Ces sols, dont la nomenclature peut sembler bizarre, alliant 2 pédogenèses successives, sont en réalité formés sur un matériau remanié par la morphodynamique, issu d'artérites faiblement ferrallitiques sur mugéarites et de cendres andiques les ayant à l'origine recouvertes. C'est pourquoi les caractères pédologiques sont mixtes. On les observe au nord de l'île, entre Sainte-Marie et Saint-André : 2 000 à 3 000 mm de pluviométrie annuelle, 4 mois à moins de 100 mm, 21 à 22 ° C de température moyenne annuelle, altitude inférieure à 400 mètres ; superficie : environ 2 800 hectares.

- Andosols non perhydratés (unités 32 et 33)

A l'échelle du 1/50 000 nous en avons représenté un seul ensemble (12 000 hectares), qui, dans le détail, pourrait se subdiviser en 2 sous-ensembles inégaux :

– Les andosols faiblement désaturés
  Ces sols intéressent les versants «sous le vent» où ils représentent la bande d'étroite transition entre les sols bruns andiques situés en dessous de 650 mètres d'altitude et les andosols désaturés situés au-dessus de 750 mètres. Leur superficie est faible (environ 1 500 hectares).
– Les andosols désaturés
  Leur aire d'extension est importante (environ 11 000 hectares). Formés sur cendres non ou peu remaniées, on les trouve de 750 à 1 300 mètres d'altitude dans l'ouest et le sud, de 400 à 1 000 mètres au nord. Leurs conditions climatiques sont les suivantes : pluviométrie de 1 500 mm à 3.000 mm, 4 à 6 mois à moins de 100 mm, température moyenne annuelle : 17 à 20 °

- Andosols perhydratés (unités 34 à 39)

Ce sont toujours des andosols désaturés et «chromiques» c'est- à-dire à complexe organo-minéral non «noircissant» (il n'y a pas d'andosols «mélaniques» à la Réunion).

Les perhydratés sur cendres épaisses du Piton des Neiges ont une extension considérable, de l'ordre de 20 000 hectares. Ces sols apparaissent à 1 300 mètres d'altitude dans l'ouest, 1 200 mètres au sud, 1 000 mètres au nord et 800 mètres au nord-est. Ces altitudes correspondent à des pluviométries supérieures à 1 500 mm associées à des précipitations «occultes» toujours importantes. Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 14 et 18 ° C. En dessous de 14 ° , on se trouve toujours dans le domaine des andosols perhydratés mais dans les landes éricoïdes de haute altitude à faibles placages cendreux, donc sur d'autres unités de milieu.

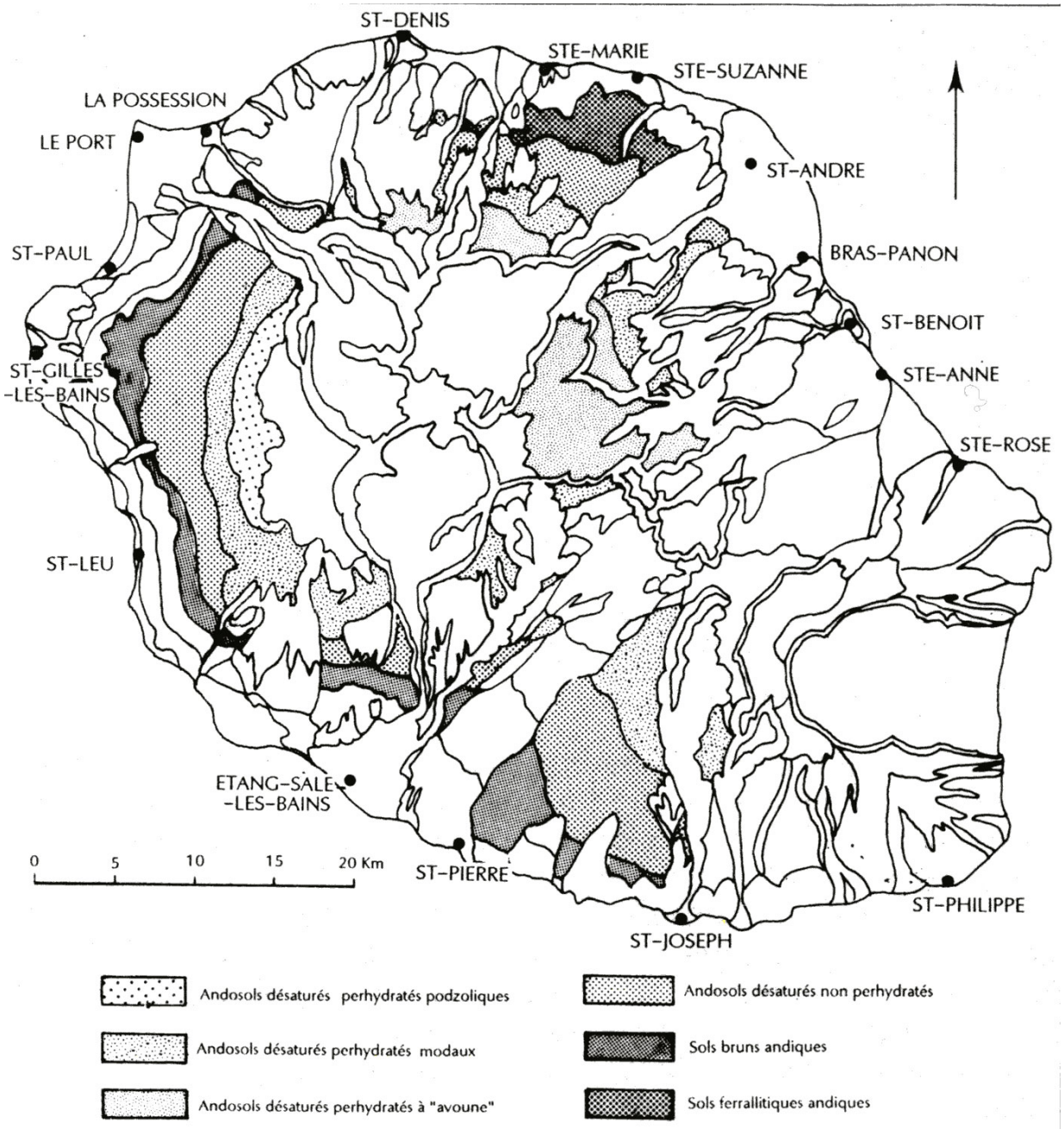
Ces sols présentent quelques spécificités réunionnaises qui nous ont amené à les différencier en :

– Andosols perhydratés «modaux» (unités 34 et 35) : ils représentent 10 000 hectares répartis en deux catégories, non différenciées sur la carte à l'échelle du 1/50 000 :
  – Les andosols moyennement perhydratés, localisés dans l'ouest entre 1 300 et 1 600 mètres d'altitude, avec 1 500 à 1 600 mm de pluviométrie annuelle et 3 à 4 mois à moins de 50 mm.
  – Les andosols fortement perhydratés, localisés au nord, nord-est et centre de l'île entre 800 et 1 300 mètres d'altitude avec plus de 3 000 mm de pluviométrie annuelle et sans saison sèche (aucun mois à moins de 50 mm).
– Andosols perhydratés podzoliques, à «mascareignite» (unité 36) : localisés sur le panneau occidental (2 400 hectares) entre 1 600 et 1 800 mètres d'altitude avec 1 500-1 600 mm de pluviométrie, 14 à 16 ° C de température moyenne annuelle.

– Andosols perhydratés à «avoune» (Unités 37 à 39) : ils sont localisés sur les pentes les plus humides (3 000 à 6 000 mm), à partir de 1 300 mètres d'altitude (température moyenne = 15 à 16 ˚), au nord-est et au centre du massif. Leur superficie est de 7 000 hectares.

Nous allons maintenant passer en revue ces ensembles morphopédologiques.

FIG. 6.10 – *Les grandes catégories de sols à caractères andiques sur cendres issues du Piton des Neiges*



(.jpg)

6.5.4 Les placages de tufs résiduels à sols bruns squelettiques (unité 27)

Situés en dessous de 300 mètres d'altitude, entre la Possession et les Avirons, ces placages de «tufs jaunes» ou de tufs ponceux noirâtres sont éparpillés en de multiples lambeaux allongés, souvent de moins de 1 hectare (Fig. 9.1). Ces pyroclastites de la phase V ont résisté à l'érosion et reposent sur les coulées des phases III ou IV, parfois sur les «tufs» de SaintGilles.

Lorsqu'on peut voir des coupes complètes de ces tufs (tranchées de route par exemple), on constate une assez grande hétérogénéité granulométrique, mais une tendance au litage. L'épaisseur du recouvrement résiduel est comprise entre 50 cm et 2 mètres. Le matériau, peut-être d'origine phréato-magmatique, plus ou moins bréchique, de teinte d'ensemble beige-jaunâtre, brun-clair ou grisâtre, est formé de projections de cendres et lapilli ponceux soudés. Il peut emballer une quantité importante d'éléments grossiers, les blocs et cailloutis étant les plus importants à la base du dépôt. De part et d'autre de la Ravine Saint-Gilles, en particulier à Grand-Fond et en contrebas du village de Villèle, le dépôt commence par 1 à 2 mètres de lapilli noirs ponceux lités et filtrants, souvent exploités comme sable de maçonnerie. Ces matériaux seuls (sans le «tuf jaune») ont été observés à Grand-Fond, la Possession, Bois de Nèfles, Saint-Gilles-les-Bains. Les «tufs jaunes» ont surtout été localisés autour de l'Eperon, à l'aval de Plateau Cailloux et sur le littoral : de part et d'autre de la Ravine des Trois Bassins, à la Pointe-au-Sel, entre la Ravine du Trou et la Ravine des Avirons.

Les sols sur tufs sont pratiquement inexistants. Ceux qui devaient y exister (sols bruns eutrophes) y ont été en très grande partie décapés par l'érosion, en dessous de 300 mètres d'altitude. Le tuf est donc sub-affleurant ou recouvert d'un sol brun peu épais de moins de 30 cm d'épaisseur. Ces matériaux lités sont peu perméables et peu poreux, non exploitables par les racines à moins d'un «rootage» ou d'un éclatement à l'explosif, coûteux. En dehors de cas particuliers, les tufs, malgré leur topographie favorable absente d'«aspérités», ont une très faible valeur agricole.

6.5.5 Les sols bruns andiques (unités 27 et 29)

Le grand domaine des sols bruns andiques (7 000 hectares) intéresse une bande de 1 à 4 km de large, depuis la Possession (Sainte-Thérèse) jusqu'à Saint-Joseph. Il correspond dans la façade «sous le vent», à l'extension aval, en dessous de 650 mètres d'altitude, des cendres de la phase V du Piton des Neiges qui, rappelons le, ont recouvert aussi la face sud-ouest de la Fournaise.

Les sols bruns andiques séparent les sols bruns non ferruginisés sur coulées (en dessous de 450 mètres d'altitude) et les andosols proprement dits (au-dessus de 650 mètres).

6.5.6 Relations «modelé-matériaux superficiels»

Ce n'est qu'à partir de ce domaine des sols bruns andiques, donc au-dessus de 450 mètres d'altitude (dans l'ouest), que la topographie commence à montrer les ondulations et bossellements caractéristiques des coulées sousjacentes. En contrebas, dans le domaine des sols bruns, les versants, hormis les principaux fronts de coulées, ont été régularisés par le décapage (glissements, érosion en nappe), favorisé par une argilification plus intense des matériaux.

A partir de 450 mètres, les coulées de la phase IV (mugéarites) enfouies sous les cendres et tufs montrent une argilification altéritique de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on monte en altitude. 11 en est de même pour les cendres ; mais entre 450 et 650 mètres, ces cendres sont déjà riches en halloysite. Or, plus le matériau est argileux (au sens minéralogique du terme, c'est-à-dire riche en éléments phylliteux), plus l'infiltration est ralentie et plus il est apte, à l'état saturé, à fluer et glisser sur les versants.

Ainsi, les sols bruns andiques affectent un matériau superficiel qui est la plupart du temps composé de pyroclastites (cendres et «tufs jaunes») remaniées par des processus de glissements, avec estompage des bosses (fronts

et bordures de coulées) et remplissage des creux. L'altération des coulées nappées de cendres participe assez peu à cette morphodynamique, l'argilification de la roche n'étant pas assez avancée, contrairement au domaine ferrallitisé du nord de l'île (unités 30 et 31).

Le résultat sur la topographie est que les ondulations des nappes de lave superposées et imbriquées, bien qu'on les reconnaisse nettement, on été amorties. Seuls restent en relief, les ressauts rocheux dus aux principaux fronts et bordures des coulées, ceux-ci étant d'autant plus abondants que la pente générale des versants est forte.

6.5.7 Description des sols

Les sols bruns andiques sont actuellement cultivés en canne à sucre. Ils montrent le profil moyen suivant :

- 0 - 25 cm : brun à brun foncé ; absence d'éléments grossiers. Structure toujours bien exprimée (polyédrique anguleuse moyenne à fine). Très nombreuses racines fines en chevelu (canne à sucre). Texture argileuse.
  Caractères analytiques : 50 % d'argile, 30 % de limons, 20 % de sables ; pH (eau) = 5,7 (légèrement acidifié par les engrais ?) ; pH (NaF) = 7,7 ; carbone = 2,4 %, (matière organique = 4,2 %) ; azote total = 2,3 . ; C/N = 10 ; phosphore assimilable = 60 ppm ; phosphore total = 1 000 ppm ; CEC (au pH du sol) = 11 mé/100 g ; Ca = 5,7 mé ; Mg = 3,2 mé ; K = 0,3 mé (valeur élevée due à la fertilisation) ; saturation = 95 %.
- 25 - 100/150 cm : transition progressive avec l'horizon de surface ; brunjaune ; quelques éléments grossiers de 1 à 5 cm de large : débris de «tuf jaune», quelquefois de mugéarite altérée grisâtre. Structure polyédrique grossière (sur les tranchées desséchées : fentes verticales assez larges), agrégats très cohérents, non friables ; absence de litation. Texture argileuse. Nombreuses racines (canne).
  Caractères analytiques : 60 % d'argile, 25 % de limons, 15 % de sables ; densité apparente = 1,0 ; pH (eau) = 6,0 ; pH(KCI) = 5,4 (pH = + 0,6) ; pH (NaF) = 8,1 ; jusqu'à 80 cm de profondeur : carbone = 0,6 % (matière organique = 1 %), azote total = 0,5 , (C/N = 13) ; phosphore assimilable = 30 ppm ; phosphore total = 900 ppm ; CEC (au pH du sol) = 9 mé/100 g ; Ca = 5 mé ; Mg = 2 mé ; K = 0,01 mé ; Na = 0,4 mé ; saturation = 85 %.
- 100/150 - 150/200 cm : limite nette avec le matériau supérieur ; altération des coulées ; couleur d'ensemble grisâtre ; débris de «gratons» altérés gris à gris-rosé, de toutes tailles ; matrice argileuse brun-grisâtre, friable, à structure polyédrique.
- à partir de 150/200 cm : coulée en «gratons» grisâtre, peu altérée.

6.5.8 Variations autour du profil moyen

Le matériau supérieur, remanié, à base de cendres et de tuf jaune», a une épaisseur variable, mais généralement supérieure à 1 mètre ; localement, il peut s'épaissir sur 2 mètres. A l'opposé, certaines plages, plus «rabotées» que d'autres, montrent à «l'affleurement» des sols bruns non ferruginisées (et non andiques) sur mugéarites (Saint-Gilles-les-Hauts).

La couleur de l'horizon B peut tendre vers le brun rougeâtre aux altitudes inférieures (400/500 mètres) et vers les jaunes plus ternes aux altitudes supérieures (600-700 mètres). Les différences de teintes ont deux origines possibles : l'état d'hydratation des oxydes de fer dans le matériau cendreux et la couleur (brune ou rougeâtre) de l'altérite éventuellement intégrée aux cendres par remaniement. Le degré de remaniement (par la morphodynamique de glissements) est également variable ; la teneur en éléments grossiers est cependant toujours inférieure à 15 % ; les éléments sont composés de tufs, parfois de mugéarite altérée quand le colluvionnement a raclé en même temps l'altérite sous-jacente brunifiée (localement faiblement ferrallitisée et plus rougeâtre).

Il faut également signaler par endroits la présence de «tufs» lités en place («tuf jaune»), ayant donc, plus qu'ailleurs, résisté à l'érosion. Ils sont, soit recouverts de matériaux cendreux remaniés à sols bruns andiques, soit subaffleurants et alors affectés par une pédogenèse brunifiante plus ou moins ferruginisée. Cette situation se

trouve sur les vastes replats autour de SaintGilles-les-Hauts, Fleurimont, Bernica, Le Guillaume. Dans ce secteur, il y a une imbrication spatiale, non cartographiable à l'échelle du 1/50 000, de sols bruns non ferruginisés sur mugéarites, de sols bruns ferruginisés sur tufs, et de sols bruns andiques sur cendres remaniées.

6.5.9 La pédogenèse

D'après les analyses minéralogiques réalisées par V. ROSELLO (1.984) et L. DENAIX (1.989), les sols bruns andiques contiennent 5 à 10 % de produits amorphes, environ 50 % d'halloysite, 20 à 40 % de gibbsite et de l'ordre de 30 % de goethite.

La composition chimique totale dans l'horizon B, donne en moyenne 35 % Fe_2O_3 30 % Al_2O_3 10 % SiO_2 10 % d'autres minéraux 15 % de perte au feu,

La perte au feu, qui dépend du taux de matière organique et d'amorphes ne dépasse pas 20 % (alors qu'elle peut monter jusqu'à 50 % dans les andosols typiques).*

6.5.10 Utilisation agronomique

Les sols bruns andiques ne présentent pas de contraintes importantes du point de vue agricole. Ce sont des «terres franches», profondes et sans cailloux (excepté certains ressauts soulignant les fronts et bordures de coulées).

Leur utilisation actuelle est la canne à sucre généralement non irriguée (photo A.17). On y trouve exclusivement des exploitations familiales («petits planteurs»). La majorité des exploitations a une superficie de 1 à 3 hectares, soit en «colonat» partiaire, soit en faire-valoir-direct. Depuis 1.975, de plus en plus d'exploitants accèdent aux «lots SAFER (A.3)» allant jusqu'à 10 hectares. L'absence d'irrigation est le premier facteur limitant l'obtention de forts rendements (actuellement 60 à 70 t/ha). Dans l'ouest, jusqu'au niveau de Saint Leu, cette irrigation devrait intervenir dans les 10 années qui viennent grâce à l'amenée d'eau par le «basculement des eaux» de la rivière du Mât et de la rivière des Galets. Au sud de Saint Leu, l'amenée d'eau à partir du Bras de Cilaos irrigue en dessous de 300 mètres d'altitude et n'atteint donc pas les bruns andiques.

Plus de 200 ans de culture de canne à sucre (ayant remplacé le café) ont amélioré les propriétés physiques de ces sols. Sur les 30 centimères supérieurs, le puissant enracinement fasciculé de la canne y a engendré une structure polyédrique moyenne très intéressante et une homogénéisation de la répartition de la matière organique (3 à 5 %, rapport C/N = 10). Leur fertilité chimique est plus intéressante que celle des andosols proprement dits qui commencent au-dessus (plus de 700 mètres). Elle est par contre inférieure à celle des sols bruns située à altitude inférieure.

Le phosphore total est présent en quantifié relativement importante (800 à 1 200 ppm en surface) mais le phosphore dit «assimilable» (OLSEN) ne représente que 50 à 200 ppm ce qui est assez faible. L'énergie de fixation du phosphore, encore importante, est cependant moindre que dans les andosols proprement dits du fait de la présence d'halloysite à côté des allophanes (Fig. **??**). On peut parler de carence «moyenne à faible» pour le phosphore, dépendant beaucoup du passé cultural.

Le pH, compris entre 5,4 et 5,7 dans les 30 centimètres supérieurs, est moyennement acide. Le chaulage n'est donc pas une nécessité sur ces sols.

Les sols bruns andiques sont donc de «bons sols».

Actuellement, en culture de canne non irriguée, le manque d'eau étant limitant, on préconise le plan de fumure suivant pour 80 t/ha (CHABALIER, 1.988)

. à la plantation : 60 unités N, 60 unités ¶205, 200 unités K_2O, en entretien annuel sur repousses : 60 unités N, 50 unités P_20_5, 180 unités K_2O.

En cultures plus intensives irriguées, des doses plus fortes peuvent être valorisées (optique : 11xxxx 0 t/ha) apportées de la façon suivante pentes inférieures à 20 % et le découpage par les ravines, relativement peu serré, y dégage de grands ensembles aisément mécanisables. Au sud de Trois-Bassins, les replats sont plus morcelés et de faible taille. Plus de 60 de la superficie possède des pentes supérieures à 20 % ; l'accès à la mécanisation y sera plus difficile.

. La culture de la canne sur les terres à pentes faibles (moins de 20 % de pente)

Sur les petites et moyennes exploitations, cas le plus général, la mécanisation des travaux peut se faire dans de bonnes conditions techniques du fait de l'absence de pierres («terres franches»). Seule la récolte totalement mécanique avec les récolteuses-tronçonneuses actuelles pose encore des problèmes sur les parcelles de petites dimensions (photo A.29) et au-delà de 12 % de pente (à cause de la remorque).

Le CEEMAT (A.3) essaie, en liaison avec des constructeurs, de mettre au point une récolteuse plus maniable (coupe de cannes entières). La mécanisation lourde, qui s'avère de plus en plus nécessaire, compte tenu du coût élevé et de la raréfaction de la main d'oeuvre, oblige à se préoccuper de la compaction des sols que cette mécanisation peut entraîner. Les travaux réalisés par le CEEMAT (A.3) dans ce sens semblent montrer que les sols bruns andiques sont moins sensibles au compactage que les sols ferrallitiques du nord et du sud de l'île, plus riches en halloysite et travaillés généralement en conditions d'humidité plus défavorables.

L'installation prochaine de l'irrigation dans cette zone changera probablement les données du problème. Le développement conjoint de la mécanisation (de la plantation à la récolte) et de l'irrigation risque de provoquer un compactage plus rapide des sols, avec pour conséquence une plus grande sensibilité à l'érosion en saison pluvieuse (diminution de l'infiltrabilité).

- La culture de la canne sur les terres à pentes fortes (20 à 30 % de pente)

C'est au sud de Trois-Bassins que l'on rencontre surtout ce modelé accidenté et coupé de nombreuses ravines. Les exploitations y sont petites (moins de 3 hectares), souvent morcelées, à pentes irrégulières et mal désservies. Il est alors difficile de remplacer le travail manuel ; seul le chargement de la canne est encore réalisable jusqu'à 30 % de pente. Tous les 6 à 10 ans, la replantation doit être précédée du «dessolage» avec extirpation des vieilles souches de cannes par un labour ou un pulvérisage lourd (cover-crop) puis un affinage. Sur les pentes fortes, il faut utiliser des tracteurs à 4 roues motrices ou à chenilles. Mais compte tenu des risques de basculement de l'engin et de l'exiguité des parcelles, il est pratiquement impossible de travailler en courbes de niveau. Actuellement lorsque le petit planteur se décide à régénérer sa parcelle de canne (souvent au-delà de 10 ans, jusqu'à 15 ans), il fait tous ses travaux de dessolage soit à la main, soit au tracteur dans le sens de la pente (le sillonnage et la plantation de boutures étant alors manuels). Une telle pratique est bien sûr fortement déconseillée car très dangereuse vis-à-vis des risques d'érosion, le sol étant peu couvert pendant la saison des pluies qui suit. Dans l'optique d'une irrigation bien conduite, on pourrait espérer une couverture plus rapide en saison sèche et alors assez efficace en décembre pour protéger le sol, à condition toutefois de réaliser les travaux de dessolage-replantation très précocement. La solution du travail minimum du sol est envisageable

destruction des vieilles souches et désherbage au round-up («labour chimique») puis simple sillonnage (mécanique ou manuel) et plantation des boutures avec léger enfouissement des fertilisants.

- Les alternatives à la monoculture de la canne à sucre

En conditions irriguées (ou non) beaucoup d'autres cultures sont possibles dans ces zones occidentales de moyenne altitude (jusqu'à 700 mètres) à sols bruns andiques : que ce soient les cultures vivrières, maraîchères, fruitières, fourragères, florales, le géranium ou le tabac. Les températures et l'ensoleillement sont très favorables à une large diversification.

La préoccupation essentielle doit être la protection des sols contre l'érosion, surtout dans la zone la plus «sensible», entre Trois-Bassins et les Avirons, où dominent les pentes supérieures à 20 %. Les cultures les plus «dangereuses» seront les cultures annuelles ou/et sarclées (maïs, légumes, tabac, ananas, géranium...). Avec l'irrigation 2 cultures par an sont possibles, à condition d'adapter des rotations et assolements compa-

tibles avec la conservation de la fertilité (stock organique et minéral) et la protection contre l'érosion. Dans les systèmes de cultures, il faudrait faire une large place à l'agroforesterie et à l'embocagement, au travail minimum du sol avec couverture permanente contrôlée aux herbicides (voir plus loin), aux restitutions organiques (fumier, composts...).

Le travail du sol et les finitions de surface, lorsqu'ils sont nécessaires, se feront en courbes de niveau. Les engins à dents seront préférés aux engins à disques (prohiber le rotavator et les passages abusifs de pulvériseur). Il faut envisager l'intégration de l'élevage, afin de permettre la valorisation de soles fourragères pluri-annuelles (régénération) ou permanentes (pentes supérieures à 30 %) - et la fourniture de fumier.

Les graminées fourragères les plus intéressantes sont Chloris gayana, Pennisetum purpureum, le Bana grass (hybride de P. purpureum et P. typhoïdes), Setaria sphacelata. Parmi les légumineuses, on peut citer Desmodium intortum, Stylosanthes gracilis, Centrosema pubescens, Pueraria phaseoloides.

En l'absence de prairie (superficie de l'exploitation insuffisante), la pratique du «boeuf-fumier» à l'étable est souhaitable.

L'aménagement du paysage ne devrait pas passer par une rectification importante du modelé avec remaniement de terre. Il faudra maintenir et valoriser la structure favorable du sol obtenue par la longue monoculture de la canne, et pour cela, éviter la rectification mécanique par construction de terrasses perturbant fortement le sol. Les techniques «douces» de conservation du sol doivent être privilégiées : cordons végétalisés herbacés, arbustifs ou arborés (espèces utilitaires) absorbant et coupant le ruissellement, enherbement des chemins d'eau et des dessertes d'accès, cultures en bandes alternées, cultures associées en intercalaire, couverture permanente totale du sol (mulch ou couverture vivante), boisement ou enherbement systématique des pentes les plus fortes.

Si le maraîchage intensif doit se développer, il faudra le réserver aux secteurs à pentes les plus faibles (moins de 10 %) car un sol propre et finement travaillé (mécanisation individuelle du type «motoculteur») est alors nécessaire surtout pour les semis de petites graines (carotte, oignon, choux, tomate...). La région du Guillaume à Trois-Bassins est la plus favorable. Les régions à pentes fortes (sud de Trois-Bassins) auront plutôt une «vocation» d'arboriculture fruitière (agrumes, manguiers, papayers, avocatiers, letchis...). Les plantations se feront par trouaison ; le sol sera enherbé en permanence (avec des espèces peu concurrentielles) pour le protéger contre l'érosion et permettre (si les pentes sont inférieures à 30 %) le passage de tracteurs assurant une certaine mécanisation (entretien, récolte...). L'irrigation sera alors du type «goutte à goutte».

6.5.11 Les sols ferrallitiques andiques (unités 30 et 31) - Relations entre le modelé et les formations superficielles

Ce domaine s'étend au nord de l'île, de 100 à 400 mètres d'altitude, entre la Ravine des Patates à Durand et la Petite Rivière Saint-Jean. Il est entièrement couvert en canne à sucre (photo A.53), pour la plupart de grandes exploitations mécanisées (Bagatelle, Beaufond, Ravine Coco...).

Le modelé, la plupart du temps (unité 30) peu accidenté, est formé de larges ondulations coupées de ravines et de gouttières concaves colluvionnées ; les pentes dépassent rarement 10 %. Ce n'est qu'à partir de 300/350 mètres d'altitude et jusqu'à 400/450 mètres (sur l'unité 31), en amont de ces larges «plaines» de coulées sub-cotières, que les pentes augmentent assez brutalement (20 à 35 %) : La Confiance, La Ressource, Chiendent, Bellevue... Au-dessus de 400/450 mètres, on passe sur les cendres peu remaniées à andosols typiques (unités 32 et 33), moulant les coulées qui ont conservé leurs bossellements d'origine.

Dans cette région, les formations superficielles qui composent actuellement les sols dérivent de 2 matériaux à l'origine superposés, puis imbriqués du fait de la morphodynamique qui a affecté l'ensemble (Fig. 6.7)

- une couche d'altérites ferrallitiques développées directement sur les mugéarites (phase IV),

- une couche de cendres de la phase V, à caractères andiques qui, à l'origine, ont nappé sur 1 à 4 mètres les mugéarites, ces dernières étant alors déjà en cours de ferrallitisation.

L'ensemble, sous climat humide et couverture forestière, a continué à s'altérer de façon différente : approfondissement de la ferrallitisation des mugéarites et andosolisation des pyroclastites. Peu à peu, du fait de leur poids et de leur état d'hydratation, ces formations se sont alors destabilisées, entrainant l'ensemble ; elles ont subi une morpho-dynamique en mouvement de masse à faibles transports : creep, fluage, colluvionnement, aboutissant :

- à une régularisation équivalant à un rabotage de la topographie bosselée des coulées d'origine, sous forme de pseudo-glacis à pentes faibles (moins de 10 %),
- à un brassage des deux matériaux différemment altérés : altérites ferrallitiques issues de mugéarites et andosols issus des cendres plus récentes.

Les sols qui en résultent ont des caractères mixtes juxtaposés, au sein des profils : ferrallitiques faiblement désaturés et andiques désaturés non perhydratés.

6.5.12 Les sols

Les sols sont formés sur matériaux superficiels remaniés incorporant cendres et altérites, pouvant présenter jusqu'à 3,50 mètres d'épaisseur, et dont la couleur d'ensemble est brun-rougeâtre à brun-jaune. Il y a parfois, surtout à la base, quelques petits éléments grossiers d'altérites grisâtre sporadiquement lités. Mais en règle générale, le matériau apparaît très homogène et isotrope, ce qui peut poser des problèmes d'interprétation sur le terrain quand il s'agit de différencier les cendres non remaniées des cendres remaniées à incorporation d'altérites ferrallitiques. Plus la part des cendres «andiques» est importante, plus la couleur tire vers le brun- jaunâtre ; la structure apparaît alors continue, la consistance friable et la granulométrie riche en limons. Lorsque les altérites sont dominantes, la couleur est plutôt brun rougeâtre, la structure (polyédrique) est mieux développée, la texture est plus argileuse et les débris de roche pourrie sont plus abondants.

Dans ces conditions, il est difficile de décrire un profil type.

En général :

- l'horizon supérieur, brun-grisâtre foncé, de 20 à 40 cm d'épaisseur, est toujours fortement structuré : structure polyédrique fine à moyenne, créée et entretenue par l'enracinement dense de la canne à sucre.
    - Le taux de matière organique est élevé (5 à 10 %) ainsi que l'azote total (5 à 10 .).
    - Le C/N est de l'ordre de 11.
    - Le pH (eau) de l'ordre de 5,5, est modérément acide.
    - La capacité d'échange est d'environ 8,5 mé/100 g.
    - Concernant les bases échangeables :
        - Ca = 3,5 mé ;
        - Mg = 2,5 mé ;
        - K = 0,25 mé ;
        - saturation = 80 % ;
        - phosphore assimilable = 200 ppm.
- en profondeur, après une zone de transition de 20 à 40 cm, la couleur passe au brun jaunâtre. La structure devient plus massive, mais la consistance reste friable. Les caractères analytiques moyens sont les suivants :
    - pH (eau) = 4,6 ;
    - pH (KCI) = 4,6 ;
    - matière organique = 1 % ;
    - C/N = 13;
    - CEC = 4 mé/100 g ;

- Ca = 1,5 mé ;
- Mg = 1,5 mé ;
- K = 0,01 mé ;
- Al = 0,2 mé ;
- saturation = 60 % ;
- phosphore assimilable = 20 ppm ;
- phosphore total = 1 000 ppm.

Par rapport aux sols bruns andiques, ces sols sont donc franchement acides (4,6 au lieu de 6,0) dans l'horizon B. Leur capacité d'échange est beaucoup plus faible (4 mé contre 9). En surface, ils sont en revanche nettement plus riches en matière organique (7,5 % contre 4,2 %).

Les constituants minéraux des «ferrallitiques andiques» sont : l'halloysite, la gibbsite (issues des cendres), la métahalloysite (issue des altérites de mugéarites), la goethite (cendres et altérites), les produits amorphes issus des cendres (faible quantité, probablement moins de 10 %).

Implications agronomiques

Ce vaste ensemble de «terres franches» constitue, avec les sols ferrallitiques nord-côtiers (voir ci-dessus) qu'ils prolongent , la région principale des domaines sucriers des «grands» et «moyens» planteurs et des sociétés sucrières. Les exploitations de grande taille (plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'hectares) y occupent la majorité de la superficie. Pour la plupart, elles sont mécanisées jusqu'à la récolte. Une infime partie (moins de 50 hectares) bénéficie d'un appoint d'irrigation à partir de la Rivière des Pluies. Ces terres ne présentent pas de contraintes importantes.

Du point du vue physique, les sols sont profonds, sans cailloux, bien structurés et bien drainés. Ils sont plus riches en matière organique que les sols ferrallitiques non andiques qu'il côtoient. Ils présentent également une texture un peu moins argileuse. Ces deux caractéristiques sont le fait des héritages andiques des cendres intégrées dans les altérites ferrallitiques. Il s'en suit que les ferrallitiques andiques sont probablement moins sensibles au compactage que les ferrallitiques proprements dits. En canne à récolte mécanisée, il faut quand même être vigilant. Il est conseillé de pratiquer un décompactage au «paraplow» (avec localisation profonde simultanée de chaux et d'engrais) tous les 4 à 7 ans.

Du point de vue physico-chimique, ces sols sont modérément acides en surface (pH = 5 à 5,5), assez fortement en dessous de 30 cm (pH = 4,5 à 5) les recommandations de doses de chaulage peuvent être légèrement supérieures que pour les ferrallitiques, soit 4 à 6 t/ha de CaC03 à chaque replantation (environ tous les 6 ans).

Le statut phosphorique est variable suivant la fertilisation reçue historiquement. En général, le phosphore «assimilable» est correct en surface (100 à 300 ppm), très bas en dessous de 30 cm. La présence d'une certaine quantité d'allophanes dans ces sols leur confère une capacité d'échange anionique retenant assez fortement le phosphore. La fertilisation phosphorique ne sera efficace que si on remonte en même temps le pH. à pH stabilisé à 5,5, 300 unités de $P_2 0_5$ à chaque replantation devrait suffire pour la canne à sucre (CHABALIER 1.990). Sur chaque repousse, il est conseillé 150 unités de N (urée de préférence) et 240 unités de potasse, si possible fractionnés compte tenu de la pluviométrie élevée (2 000 à 3000 mm annuels), de la perméabilité forte et de la très faible capacité d'échange des sols.

La monoculture de la canne n'est pas la seule utilisation possible de ces terres. Dans le cadre d'une diversification, on pourra penser à l'introduction dans les systèmes de cultures de l'arboriculture fruitière (agrumes, bananiers, letchis, papayers...), du maraîchage, des cultures fourragères (avec élevage). Le maraîchage peut nécessiter une irrigation d'appoint en septembre et octobre.

Les cultures fourragères possibles sont assez nombreuses. Pour les graminées : Setaria, Chloris, Pennisetum, Paspalum, Bana grass, Brachiaria, Hemarthria, Digitaria, Panicum. Pour les légumineuses Desmodium, Stylosanthes, Glycine, Leucaena, Sesbania.

L'implantation de prairies ne paraît pas poser de problème majeur dans cette zone. Il faudra maintenir le chau-

lage et assurer une forte fertilisation azotée. L'exploitation peut se faire en pâturage ou en fauche mécanisée.

L'introduction de surfaces fourragères à légumineuses dans les assolements des systèmes de culture (canne-élevage, maraîchage-élevage, ou canne-maraîchage-élevage) sera toujours bénéfique à l'amélioration de la fertilité des sols.

6.5.13 Les andosols désaturés non perhydratés (unités 32 et 33)

Les andosols non perhydratés sur cendres s'observent (Fig. 6.9 et 6.10) au-dessus des «ferrallitiques andiques» (400 mètres) au nord et au-dessus des «bruns andiques» (700 mètres) dans l'ouest. Dans tous les cas, ils subissent une saison peu pluvieuse de plus de 4 mois à moins de 100 mm (Fig. 3.3). C'est une condition nécessaire, car la région est, la plus humide, avec 0 à 3 mois à moins de 100 mm, ne possède que des sols perhydratés. Leur superficie est très importante, de l'ordre de 1 2 000 hectares. Ces sols sont généralement très cultivés : géranium (ouest), tabac, cultures vivrières, maraîchères, fruitières.

Cette unité de milieu est la plus «intéressante» de l'île, des points de vue superficie et utilisation agricole mais aussi du point de vue scientifique. En effet, ces andosols ont des propriétés très particulières, dont toutes ne sont pas encore bien expliquées. C'est pourquoi nous allons nous y attarder. Tout ce que nous dirons sur les sols de cette unité sera en grande partie transférable avec quelques variations, aux autres domaines andiques de l'île, aussi bien sur le Piton des Neiges qu'à la Fournaise.

Relations «modelé-matériaux- morphodynamique»

Au moins la moitié de la superficie des recouvrements cendreux sont ici en place. Lorsqu'ils sont remaniés (glissements), ils ne peuvent se mélanger à des altérites, ces dernières étant pratiquement inexistantes au sein des mugéarites sous-jacentes. Cependant, les glissements et coulées boueuses dans le manteau cendreux ont pu faucher des fronts et bordures de coulées à blocs et «gratons» et incorporer des éléments rocheux bréchiques.

Lorsque les cendres n'ont pas été déplacées, le litage des dépôts successifs est encore nettement visible, en lits de 20 à 50 cm d'épaisseur, de teinte brune, brun jaunâtre, chocolat ou beige. Au sein de ce litage s'observe souvent le niveau de «tuf jaune» si caractéristique des pyroclastites terminales du Piton des Neiges. Ce tuf, de couleur beige à jaune pâle, épais de 20 à 80 cm, compact mais de consistance friable, se situe entre 0,5 et 2 mètres de profondeur. Il peut être plus profond dans les creux et à l'opposé, sub-affleurant («rein») sur les versants pentus.

Dans les matériaux cendreux remaniés par la morpho-dynamique, des débris de «tuf jaune» démantelé peuvent apparaître à toutes profondeurs.

Le modelé des planèzes à manteau cendreux est constitué de bossellements dont la hauteur présente une amplitude de 3 à 10 mètres, sans répartition spatiale ordonnée apparente (photos A.37 et A.47). On observe cependant que les bosses sont d'autant plus marquées (pentes et dénivellations) et rapprochées que la pente générale du versant est forte.

Cette pente générale est donc très irrégulière dans le détail. Une pente générale de 20 % peut présenter de multiples bosses à pentes locales de 30-40 %. Ce relief particulier, que l'on retrouve sur toutes les planèzes des versants externes des deux «boucliers» de la Réunion, a pour origine la dynamique de mise en place des laves qui se chevauchent et se recroisent les unes les autres, avec multiples ondulations, bordures, fronts et bourrelets de coulées. Le modelé de chaque coulée particulière est conditionné par de nombreux paramètres, entre autres la viscosité de la lave, dépendant de sa nature physique (coulées «aa», «pahoehoe» ou autobrèchifiées), de son refroidissement différentiel (extérieur/intérieur et aval/amont), de la topographie (déjà irrégulière) des coulées antérieures, et de la pente générale. A ces facteurs, il faut probablement ajouter une pseudo-périodicité dans la formation d'ondulations de surface qui serait propre à une fluidité, un débit, une vitesse d'avancement de la lave, une rugosité et une pente donnés du substrat.

Les pyroclastites ont recouvert cette topographie il y a 40 000 à 15 000 ans sur 1 à 4 mètres d'épaisseur avec épaississement préférentiel dans les zones en creux. La «rugosité» et les dénivellations des bossellements d'origine ont ainsi été émoussées. Seuls ont très vite été décapés, avec remise à l'affleurement de la roche («rein»), les fronts et bordures de coulées les plus escarpés.

Les empilements de laves, avec leur manteau supérieur de pyroclastites, ont été profondément entaillés par un réseau sub-parallèle de ravines qui reculent par creusements et effondrements régressifs (Fig. 6.11 et 6.12), actifs en périodes cycloniques (photo A.30). Le recul des ravines est ainsi une morpho-dynamique de type linéaire discontinue et «catastrophique», qui ne «fonctionne» que pendant les forts cyclones.

Les directions des ravines sont commandées par les lignes de plus grandes pentes du volcan-bouclier ; mais elles peuvent être initiées et guidées par la morphologie des coulées : emprunter une gouttière entre 2 coulées ou bien le chenal central d'une coulée particulière, entouré de ses bourrelets de refroidissement latéraux.

Les écoulements des eaux sont amortis et tamponnés par le matelas cendreux qui possède une très forte perméabilité verticale. Il n'y a pas de nappe phréatique perchée dans les 2 à 5 mètres de cendres. La façon et la vitesse avec lesquelles les eaux circulent et se répartissent dans les emboîtements poreux complexes des andosols sont peu connues. Avec 100 à 300 % d'eau pondérale, l'infiltration se fait pourtant très vite (200 à 800 mm/h) et il n'y a ruissellement (sous végétation permanente) que pendant des épisodes exceptionnels lors des cyclones. C'est quand ce «réservoir» déborde que les ravines, alors brutalement alimentées peuvent présenter un régime dangereux et se creuser par effondrement linéaire remontant. Arrivées à la base des pyroclastites, les eaux pénètrent dans les coulées en gratons ou en dalles fissurées. Sur le versant ouest les coulées de mugéarites (phase IV) sont en grande partie du type «autobréchifié» bien absorbant pour les eaux d'infiltration. En profondeur, les nappes perchées se forment dans les niveaux les plus poreux (gratons), et peuvent être drainées par les ravines. Une partie de ces eaux d'infiltration part en mer, une autre partie alimente la «nappe de base».

Les sols

Comparés aux sols non andiques, les andosols sur cendres présentent dans l'espace une relative homogénéité morphologique résultant de la régularité du saupoudrage pyroclastique du Piton des Neiges.

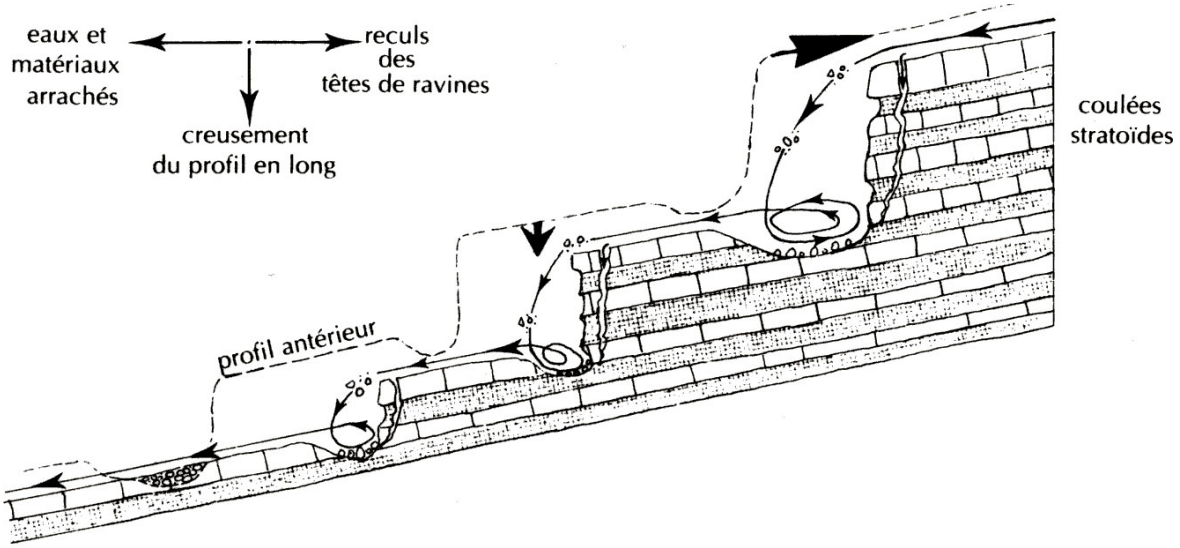
Les sols sont épais (1 à 4 mètres), sans cailloux, de teinte générale brune (brun chocolat à brun-jaunâtre) sans taches d'hydromorphie (photo A.28). Ils ne montrent pas de structuration en dessous de 30 cm ; le matériau est continu, friable, à toucher limoneux, d'aspect «léger» (faible densité apparente), toujours frais ou humide et extrêmement perméable ; pourtant il paraît inhospitalier aux racines. L'horizon de surface, qui n'a pas une couleur très nettement plus sombre (il s'agit d'andosols «chromiques») est, à l'état «non dégradé», assez épais (20 à 40 cm), bien structuré (forte stabilité structurale) et à bonne macroporosité ; il est peu net et assez pulvérulent en conditions cultivées dégradantes (géranium dans l'ouest) ; dans ce cas, l'horizon «B», peu pénétrable aux racines, est sub-affleurant. Des différences existent, dues à la succession litée plus ou moins nette des pyroclastites et à leur degré de remaniement.

Caractéristiques analytiques

1. Matière organique et azote

   – En surface (0-30 cm) : le taux de matière organique est toujours très élevé, compris entre 10 et 20 %. En conditions non cultivées (ce qui est rare), le rapport C/N, de l'ordre de 17 à 18, est donc également très élevé. Le taux d'azote total est compris entre 2,7 et 7 %. Sous cultures, le C/N est de l'ordre de 11 à 13.
   – Entre 30 et 60 cm de profondeur : il y a encore entre 5 et 15 % de matière organique, avec un taux d'azote total de 1,4 à 4 et un C/N encore plus élevé (17 à 25).
   – De 60 à 1 30 cm : le taux de matière organique est compris entre 1,2 et 5 %, avec 0,7 à 2,7 d'azote total et un C/N de 15 à 20.

FIG. 6.11 – *Composante des processus dynamiques discontinus «catastrophiques» en paroxisme cyclonique*



(.jpg)

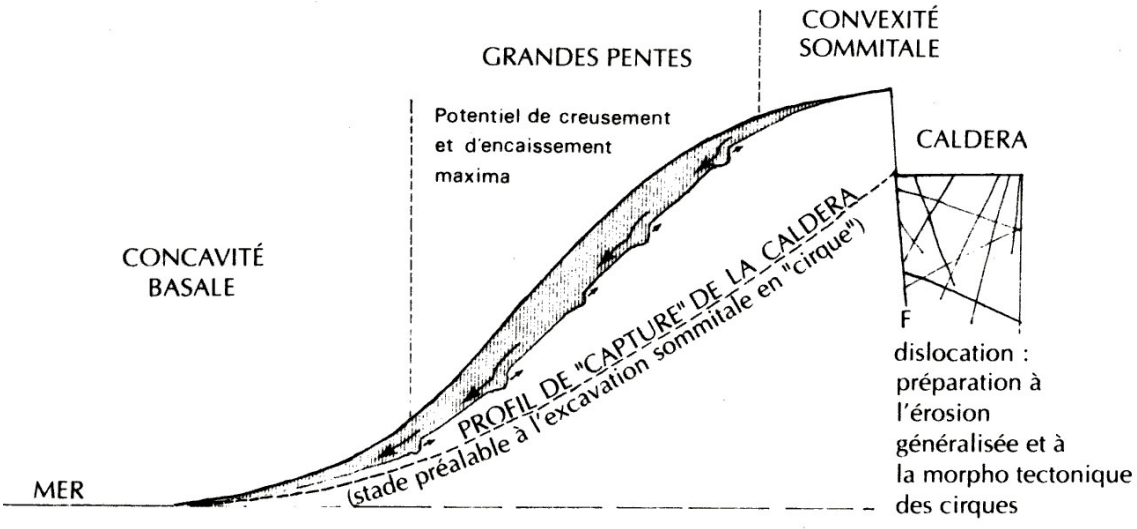
Cette richesse en matière organique, qui paraît faiblement humifiée, est une caractéristique des andosols de la Réunion. Elle ne se traduit pas par une coloration sombre des profils, comme on pourrait s'y attendre. Les fractions organiques à dominance d'acides fulviques, sont très intimement liées aux gels allophaniques amorphes ou associées aux hydroxydes métalliques (Fe et AI) sous forme de chélates ; elles sont en grande partie protégées et enfouies dans tes microstructures globulaires ou floconneuses. La répartition, la nature, le degré d'humification et le mode de liaison avec les produits minéraux amorphes de ces fractions, en liaison avec l'activité de la microflore (faible en apparence) sont très peu connus et devraient constituer un thème de recherche fondamental sur ces sols dans un objectif agronomique. L'expérience montre en effet que cette matière organique, bien que très abondante, est très difficilement accessible à la minéralisation et à la nitrification. Sur ces sols, les apports de fumier ont toujours des effets très marqués.

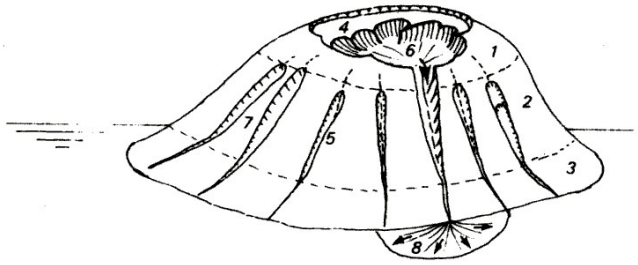
2. pH

   – Sur les versants ouest et sud (La Possession à Saint-Joseph)
   – en surface (0-30 cm), le pH (eau) est compris entre 5,0 et 5,3.
   – en dessous de 30 cm, il se situe entre 4,6 et 5.

   Ces sols sont donc nettement acides.
   Sur les versants nord et nord-est : dans ces milieux plus humides (SaintDenis à Bras-Panon), les pH sont plus acides encore en surface : pH = 4,5 à 5,1 en profondeur: pH = 4,4 à 4,7

FIG. 6.12 – *Dynamique de creusement et de recul des «ravines» sur les flancs d'un volcan-bouclier sous climat à régime cyclonique*





1 Convexité sommitale
2 Grandes pentes
3 Concavité basale
4 Caldera
5 Ravine "remontante"
6 Cirque
7 Planète triangulaire
8 Cône de déjection

(.jpg)

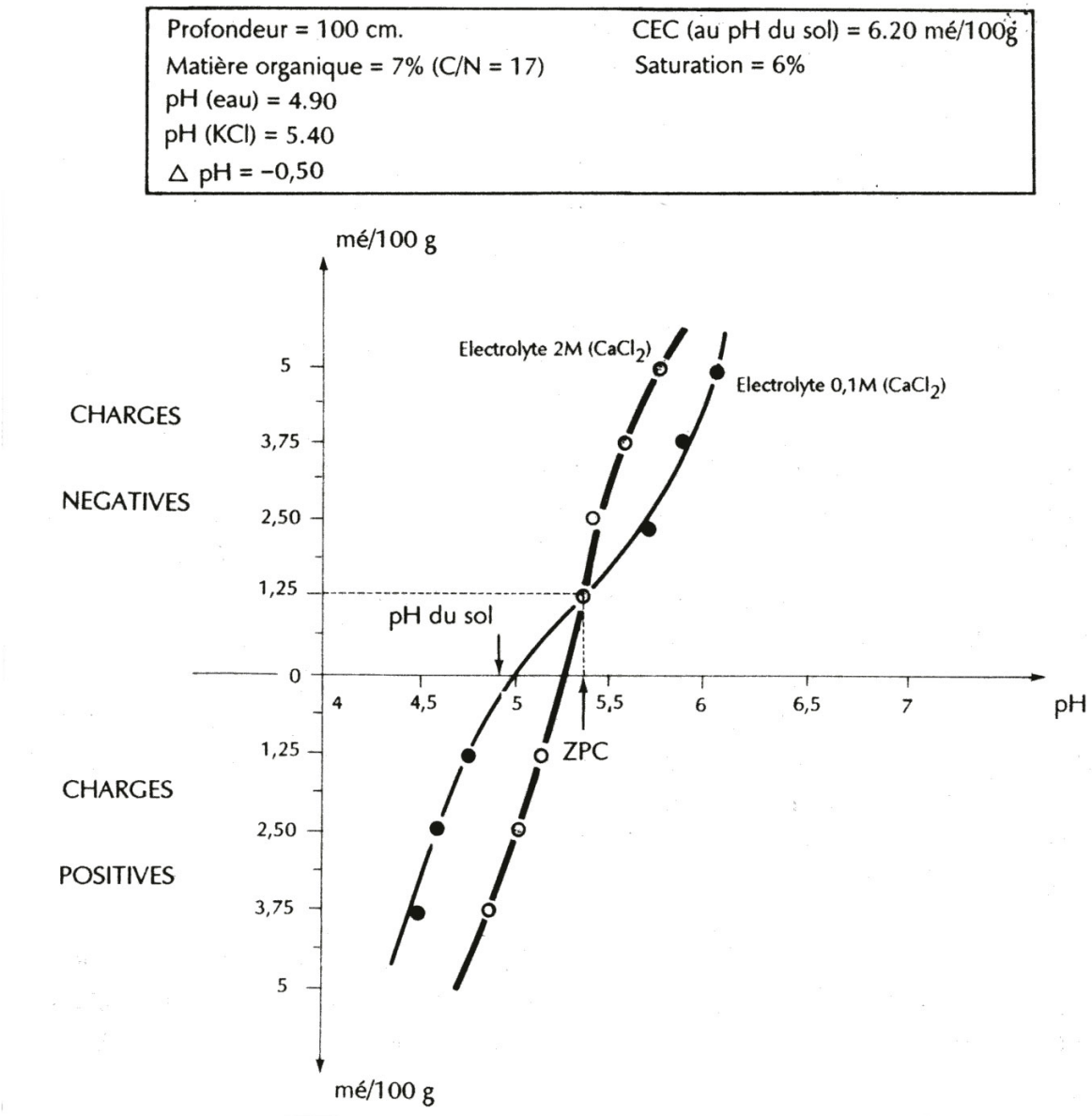
Le pH (pH eau - pH KCI) est toujours négatif et indique la présence d'une capacité d'échange anionique ; il est de l'ordre de 0 à -0,3 en surface et de - 0,4 à -0,7 en profondeur. Cette différence tient à la plus grande richesse de la surface en complexes organiques électronégatifs.
La réaction «test» au fluorure de sodium développe un pH très alcalin :

- pH - NaF = 9 en surface
- pH - NaF = 10 en dessous de 30 cm

Ceci est en relation avec la présence d'aluminium facilement extractible.
Les indicateurs «pH» et «pH - NaF» sont donc très positifs quant à la nature «allophanique» andique de ces sols.

3. Complexe adsorbant
   La capacité d'échange cationique (CEC) mesurée à la méthode de la cobaltihexamine, au pH du sol non séché, est comprise entre 6 et 7 mé/100g de sol. Une grande partie des charges négatives, donc de la capacité d'échange cationique (CEC) est le fait de la matière organique en quantité importante. Par contre, les silicates d'alumine amorphes («allophanes») et les hydroxydes amorphes développent des charges positives et sont donc responsables d'une forte capacité d'échange anionique (AEC). C'est ce qu'indique le pH du sol, toujours inférieur (de 0,3 à 0,7 unité) au pH au point de charge nulle (ZPC) (Fig. 6.13).

FIG. 6.13 – *Courbes de litration d'un andosol (Trois-Bassins) dans des solutions d'électrolyte Estimation du ZPC*



(.jpg)

La capacité d'échange anionique (AEC) n'a pas été mesurée dans nos sols. Compte tenu de leur grande richesse en aluminium dans les amorphes (imogolite en particulier), à très grande surface spécifique, autour duquel, aux pH bas, se présentent de nombreuses charges positives, on peut s'attendre à une AEC très élevée qui, d'après la littérature, pourrait atteindre 20 mé/100 g (au pH du sol). Cette forte AEC est en partie responsable de la fixation du phosphore (celui-ci est également retenu sur les hydroxydes de fer amorphes et dans les complexes organiques).

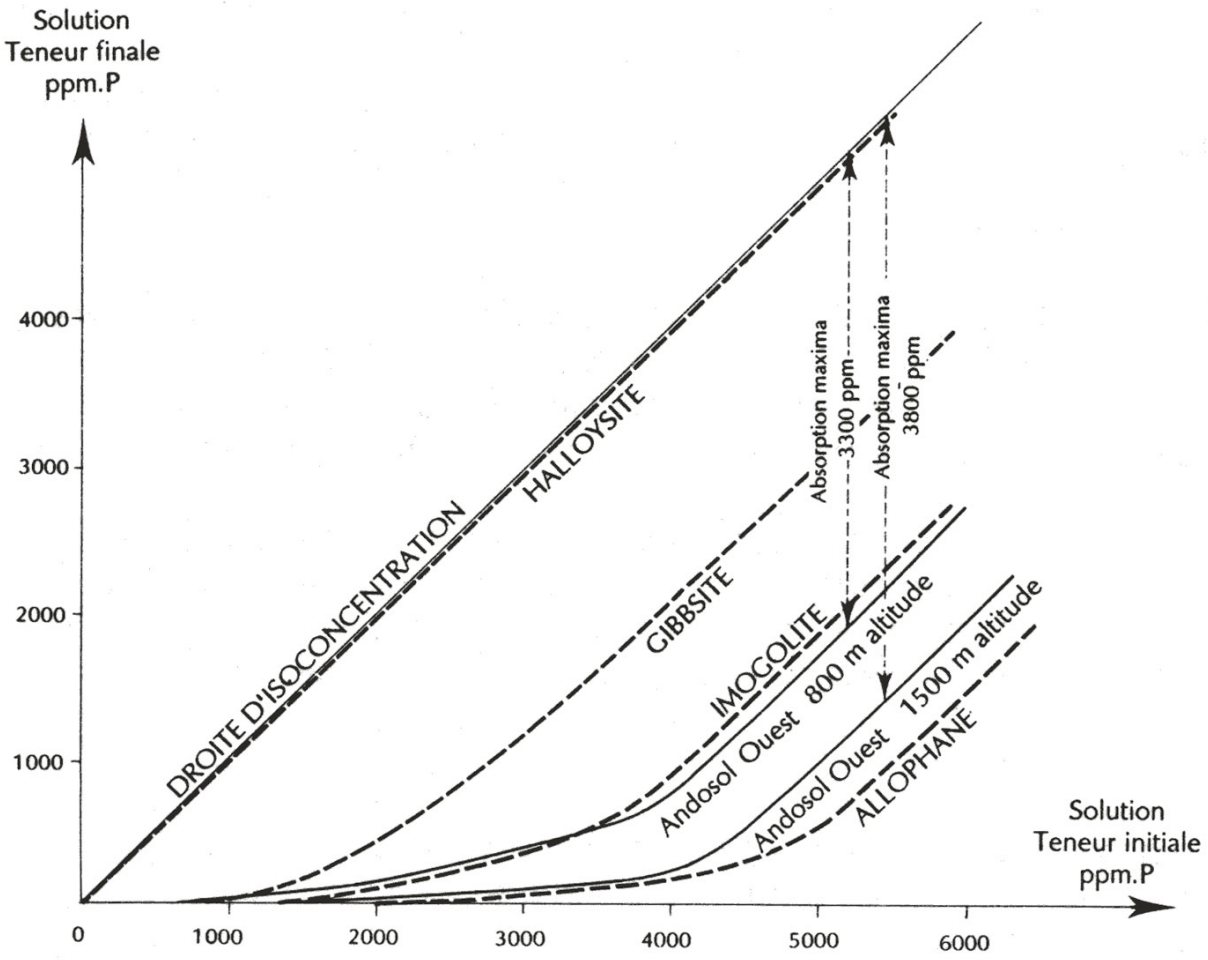
4. Bases échangeables
   Les bases échangeables sur le complexe adsorbant sont en très faibles quantités :
   - dans l'horizon supérieur : Ca = 2 à 6 mé, Mg = 0,7 à 2 mé, K = 0,1 à 0,7mé, Na = 0,1 mé (saturation V = 30 à 50 %).
   - en profondeur : Ca = 0,1 à 1 mé, Mg = 0,1 à 0,7 mé, K = 0,03 mé, Na =0,06 mé (saturation V = 2 à 7 %).

   Les sols situés au nord de l'île, plus arrosés, sont 2 à 3 fois plus désaturés que les sols situés à l'ouest.
5. Aluminium échangeable
   - Dans la région «sous le vent» à saison sèche bien marquée, les teneurs en aluminium échangeable sont de l'ordre de 1 mé/100 g dans l'horizon de surface et de 0,5 mé en profondeur.
   - Les andosols des régions nord et nord-est, à saison sèche moins marquée, sont nettement plus riches : 3 mé en surface, 1 à 2 mé en profondeur.

   Ces valeurs différentes d'un versant à l'autre sont corrélées aux pH, ceux-ci étant moins acides dans l'ouest.
6. Le phosphore
   Les andosols de la Réunion sont riches en phosphore total (1 500 à 3000.ppm) dans les 20 premiers centimètres à teneur élevée en matière organique (10 - 20 %). A 1 mètre de profondeur, il peut y en avoir encore 1 000 à 1 500 ppm, lorsque le taux de matière organique atteint 8-10 %. Le taux de phosphore dit «assimilable», dosé par la méthode «OLSEN modifiée DABIN» (extraction par NH4F), donne également des valeurs relativement élevées, de 150 à 400 ppm, entre 0 et 20 cm et de de 50 à 120 ppm jusqu'à 1 mètre. Pourtant ces résultats analytiques sont en contradiction avec les expérimentations agronomiques qui révèlent, pour les plantes cultivées, une forte carence en phosphore et qui confirment ce qui est observé sur les andosols en général, à savoir que le phosphore en forte quantité dans le sol y est fortement retenu et donc très peu biodisponible. Les apports de phosphates seuls, même calciques, sont en grande partie rétrogradés dans le matériau.
   Contrairement aux sols «classiques» (sans grandes quantités de minéraux amorphes), pour les andosols, le dosage du phosphore assimilable par la méthode précédente n'est donc pas un bon indicateur.
   Pour en savoir un peu plus, TRUONG Binh et al (1.974) ont étudié, dans les 20 premiers centimètres d'un andosol typique des hauts de Trois-Bassins (1 500 mètres d'altitude), les différentes formes de phosphore, ainsi que ses capacités de rétention et de désorption. Ainsi, pour une quantité totale (extraction HNO_3 concentré) de 2 300 ppm de phosphore, la répartition des liaisons est la suivante :
   - phosphore lié à l'aluminium (extraction AF3) 340 ppm
   - phosphore lié au fer (extraction $NaOH$) 850 ppm
   - phosphore lié au calcium (extraction H_2SO_4) 175 ppm
   - phosphore lié à la matière organique (13,4 % de matière organique) 550 ppm
   - phosphore non extractible 380 ppm

   On sait que les formes assimilables sont issues du P - Ca, d'une partie du P - AI et du P - organique (dans la mesure où cette matière organique est minéralisable). Le P- Fe (sur goethite et hydroxydes amorphes) est le plus fortement retenu. Or, dans ces sols, il apparaît nettement dominant. Le P Ca est généralement très peu abondant, sauf en cas d'apports d'engrais phospho-calciques mais alors il disparaît vite. D'autre part la matière organique, très fortement liée et enfouie dans les minéraux amorphes est très peu minéralisable.
   Aux pH bas des andosols (5 ou en dessous), les gels d'hydroxydes amorphes et d'allophanes aluminiques à surfaces spécifiques très élevées, développent de très nombreuses charges positives autour des ions AI+++ qui fixent énergiquement les ions ¶04.

FIG. 6.14 – *Courbes de fixation de phosphore de deux andosols (versant ouest) en milieu O,O1 M $CaCl$ (16 à 24 heures) Comparaison avec les courbes de référence de Churchman et Parfitt*



(.jpg)

La figure 6.13 montre la capacité de fixation du phosphore de 2 andosols de la Réunion en milieu 0,01 M Ca CI2. On y compare les teneurs initiales et finales de la solution où on a ajouté 5 g de sol. La position de la courbe par rapport à la droite d'isoconcentration (sans apport de sol) est un indicateur de la capacité de rétention du sol. Pour comparaison, nous avons ajouté sur ce diagramme les courbes caractéristiques de composants «purifiés» d'andosols, réalisées par CHURCHMAN et PARFITT (1.982) ; on constate que l'halloysite ne retient pas le phosphore, alors que les allophanes et imogolites, dont les courbes sont les plus éloignées de la droite d'isoconcentration, le retiennent en grande quantité. L'équation de l'isotherme de LANGMUIR (sous sa forme linéaire) nous donne pour les 2 sols réunionnais testés des capacités maxima de rétention de 3 300 ppm (à 800 mètres d'altitude) et de 3 800 ppm (à 1 500 mètres). Ces 2 chiffres nous permettent de prolonger les courbes précédentes jusqu'à leur parallélisme avec la droite d'isoconcentration. Pour le sol le plus typique, situé à 1 500 mètres d'altitude, TRUONG Binh, grâce à l'isotherme de LANGMUIR, trouve une variable K d'intensité (énergie) de fixation, très élevée. Le phosphore désorbé en 4 heures n'est que de 0,05 % du phosphore total fixé.

Des essais en pots ont montré que les effets d'apports de carbonate de calcium et de silicate de calcium sont significatifs sur les rendements. Mais c'est le CaSi03 qui semble le plus efficace pour l'augmentation de la disponibilité de phosphore. Ainsi l'apport de 15 t/ha de silicate permet une augmentation d'exportation de 34 % de matière sèche et de 47 % de phosphore par rapport au témoin.

Le problème est le même pour l'azote (et le soufre). Du point de vue agronomique, l'inertie du stock organique (très faible «turn over») due à son inaccessibilité à la microflore reste donc une contrainte majeure qui s'oppose à l'expression de la fertilité de ces andosols.

Le blocage du phosphore et de l'azote est d'autant plus important et énergique que les andosols sont situés en altitude, car, à l'aspect physicochimique s'ajoute la baisse des températures qui limite encore plus l'activité biologique et augmente le rapport acides fulviques/acides humiques provoquant le lessivage à plus grande profondeur de la matière organique.

7. Granulométrie

L'appréciation tactile sur le terrain en condition d'humidité naturelle, indique un sol à dominance limoneuse. L'analyse en laboratoire, sans dessiccation préalable et avec agitation aux ultra-sons, donne en général une teneur en argile plus élevée que celle donnée par l'appréciation empirique.

Cependant la répartition granulométrique issue du laboratoire dépend du temps et de la température de séchage préalable de l'échantillon. Elle dépend aussi du mode de dispersion utilisé. La méthode adoptée, qui semble donner les résultats les plus proches de la réalité, est la suivante :

- travail sur sol frais,
- tamisage,
- destruction de la matière organique (eau oxygénée),
- agitation mécanique puis aux ultra sons (3 à 4 minutes) après deferrification (HCI).

Dans ces conditions, la répartition granulométrique des andosols est à peu près la suivante, en dessous de 30 cm de profondeur (PERRET, 1.990) :

- limon grossier (20-50 μ) 7 à 12 %
- sable fin (50 à 200 μ) moins de 1 %
- sable grossier (200-2000μ).. moins de 1 %

L'influence du séchage préalable ressort bien du tableau 6.1(A. PENSEC, 1.987, mais seule une dispersion classique à l'héxamétaphosphate avait été réalisée)

Donc, un séchage à l'étuve a un effet très net sur la répartition granulométrique : les taux d'argile et de limons diminuent très fortement et les sables deviennent dominants. Ceci s'explique, comme nous le verrons, par les réorganisations microstructurales du matériau consécutives aux dessèchements importants (au delà de pF 4) qui, à l'extrême, aboutissent à une structure agrégée en pseudo-sables très stables et hydrophobes.

Il faut savoir que, pour les andosols, les classes granulométriques obtenues en laboratoire n'ont qu'une signification très relative par rapport à la réalité. Ces classes n'existent pas réellement dans un andosol

TAB. 6.1 – *Granulométrie des andosols non perhydratés* en fonction de la température et du temps de dessiccation

%	Etat frais	7 h à 30 ˚	8 h à 70 ˚	24 h à 105 ˚
Argile (0-2 μ)	31,8	3,5	1,2	0,8
Limon fin (2-20 μ)	17,4	5,5	7,7	8,4
Limon grossier (20-50 μ)	33,6	11,2	1,5	1,5
Sable fin (50-200 μ)	4,4	41,8	31,7	30,9
Sable grossier (200-2000 μ)	1,7	26,4	46,4	47,2
Matière organique	12	9	9	9
TOTAL	100,9	99,4	99,5	99,8

(à structure continue) dans son état d'humidité naturelle. Elles ont seulement une valeur opératoire et comparative vis à vis d'une méthode standard. Par exemple, un passage aux ultra sons libère des classes d'éléments qui dépendront de l'énergie et de la durée d'action en plus de la température préalable de séchage. Ces difficultés apparaissent moins sur les sols plus «classiques» (à phyllosilicates).

8. Rétention en eau pondérale

   Les andosols de la Réunion sont toujours très riches en eau. La différence entre andosols désaturés non perhydratés et andosols désaturés perhydratés tient au dépassement d'une limite de rétention en eau, liée au pédo-climat (ETP $>$ P), qui marque, pour les perhydratés, l'apparition de phénomènes de thixotropie (voir plus loin).

   En moyenne, les andosols non perhydratés ont les caractéristiques hydriques suivantes (tab. 6.2), comparées aux perhydratés :

TAB. 6.2 – *Comparaison des humidités pondérales en fonction du H des andosols perhydratés et non perhydraltés.*

(Wp exprimé en pourcentage de poids d'eau rapporté au poids de terre séchée à 105 ˚ C)

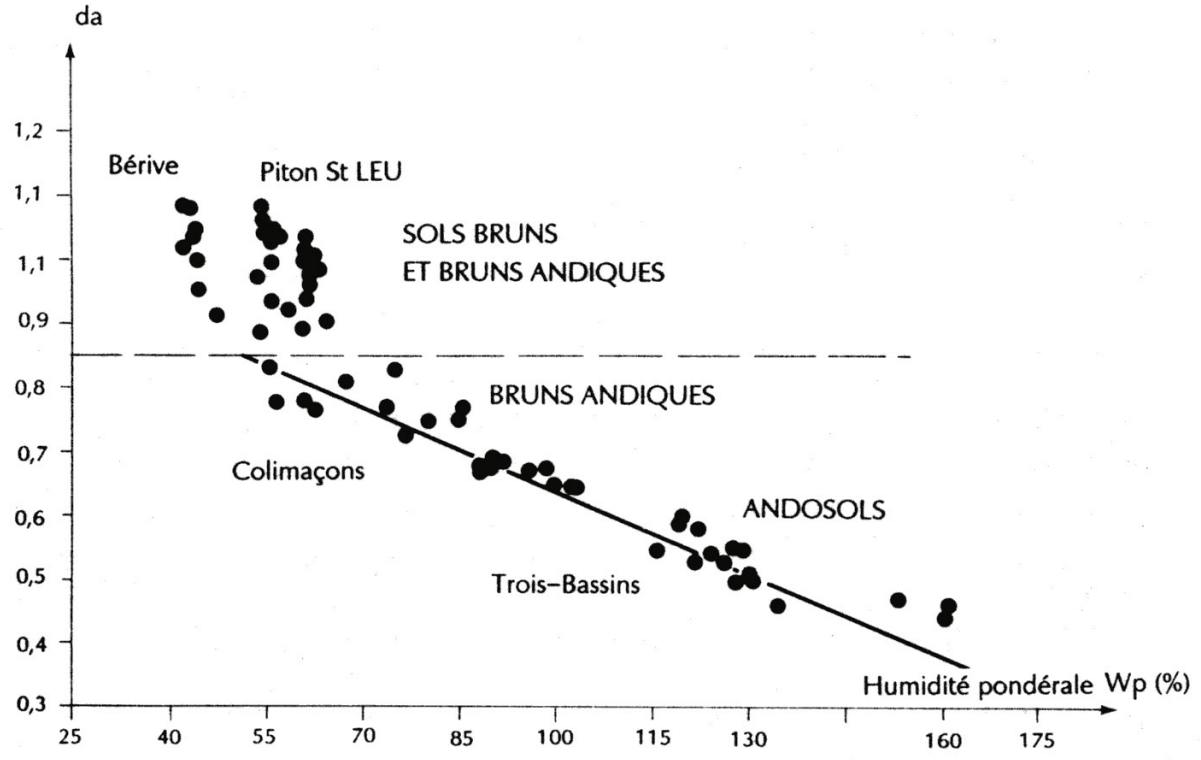
	pF	1	2,5	4,2	5,8
Andosols non perhydratés	Wp %	120-250	100-180	85-130	20-30
Andosols perhydratés	Wp %	180-310	150-300	120-200	20-30

La «capacité au champ» (pF 1,7 d'après BROUWERS) est proche de la teneur en eau à saturation ; au point de flétrissement (pF3 à 3,5 d'après BROUWERS et VAKSMANN - 1.987), l'humidité est encore très élevée.

i) Densités, porosités, indices des vides, humidités (tab. 6.3)

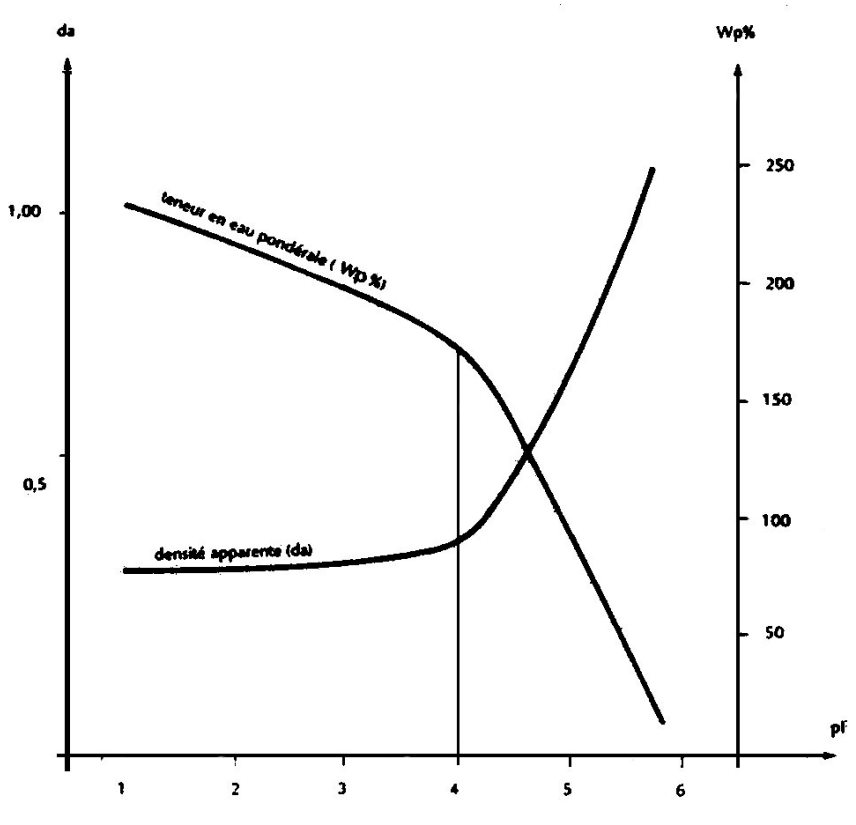
La densité apparente des andosols est toujours nettement inférieure à 1 %. C'est une de leurs caractéristiques spécifiques. Dans les horizons B, elle est comprise entre 0,3 et 0,6, aux humidités «naturelles» (entre pF 1,5 et pF 3,5 environ).

FIG. 6.15 – *Relation densité apparente- humidité pondérale à pH 1,7 (bonne corrélation pour les andosols de la Réunion). (D'après Browers et Fortier-1.988)*



(.jpg)

FIG. 6.16 – *Evolutions simultanées des teneurs en eau pondérale (Wp %) et des densités apparentes (Da) au cours de la dessiccation (D'après Rosello)*

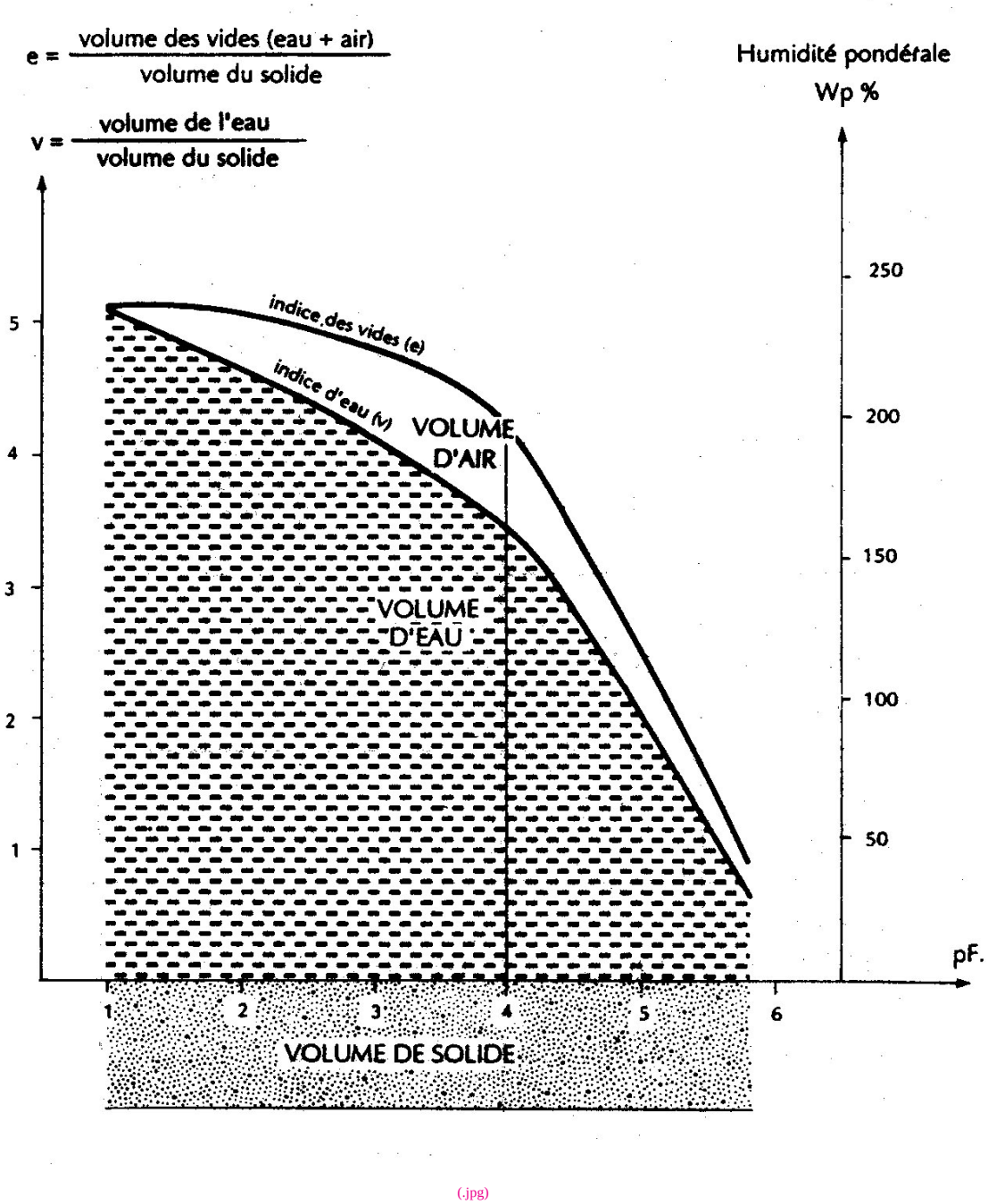


(.jpg)

Plus la densité est faible, plus l'humidité pondérale à pF 1,7 est élevée (Fig. 6.15). En réalité cette densité est évolutive. Pour un échantillon donné, elle est minima à saturation (par exemple 0,4), puis elle augmente régulièrement lorsqu'on atteint le pF 4,2 (par exemple 0,45). Un fort dessèchement artificiel ou un séchage à l'air (au delà de pF 4,2) provoque une contraction et une «densification» rapide du matériau dont la densité peut alors dépasser 1 (Fig. 6.16). Ceci est dû, nous le verrons, aux réorganisations internes importantes lorsqu'on applique de fortes contraintes hydriques.

L'indice des vides e (volume des vides rapporté au volume de solide) suit évidemment l'évolution inverse de la densité apparente (Fig. 6.17) : il est de l'ordre de 4 à 5 entre pF 1 et pF 4,2. Il chute brutalement jusqu'à 1 à 1,2 entre pF 4,2 et pF 5,8. Pendant le même temps l'indice d'eau v (volume d'eau rapporté au volume de solide) suit la même tendance : de 4 - 5 à pF 1, il passe à 2-3 à pF 4,2 et à 0,3 - 0,6 à pF 5,8.

FIG. 6.17 – *Evolution de l'indice des vides au cours de la dessiccation (D'après Rosello - 1.984)*



(.jpg)

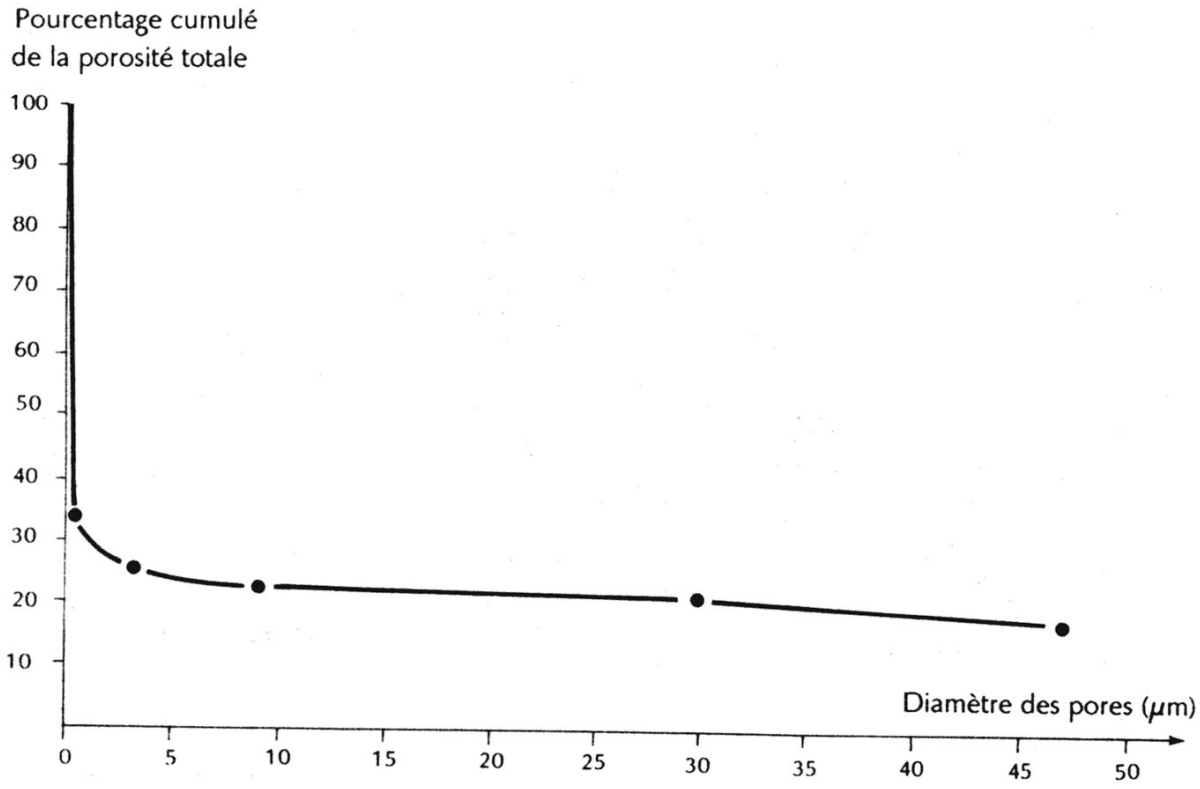
Voici pour résumer (tab. 6.3), les gammes estimées des densités, porosités et humidités en fonction des pF, pour les horizons «B» des andosols non perhydratés.

TAB. 6.3 – *Estimations des densités, porasités, indices des vides et d'humidités en fonction des pF, dans l'horizon B des andosols non perhydratés du Piton des Neiges*
(Moyennes faites d'après les travaux de V. ROSELLO 1.984, M. BROUWERS 1.986, G. DENAIX 1.989)

	pF 1	pF 2,5	pF 4,2	pF 5,8
Densité réelle dr	2,5 - 2,9 (liée au % de matière organique)			
Densité apparente da	0,3-0,5	0,3-0,6	0,3-0,6	1-1,2
Indice des vides e	4-5,2	4-5	3,2-4	1-1,3
Indice d'eau v	4-5,2	2,9-4,3	2,2-3,2	0,3-0,6
Porosité totale n (%)	80-90	75-85	78-83	50-65
Air a(%)	1-3	10-22	15-30	25-35 .
Humidité pondérale Wp (%)	120-250	100-180	85-130	20-30
Humidité volumique WV (%)	75-90	60-80	50-70	25-35

D'après BROUWERS il y aurait jusqu'à 3 % d'air inaccessible à l'eau. Cet air «irréductible» serait contenu dans les infimes pores des particules allophaniques.
La figure 6.18 donne une idée de la répartition des classes de pores.

FIG. 6.18 – *Distribution de l'espace poral d'un andosol de Trois-Bassins (10-40 cm) (D'après Broumers-1.987)*



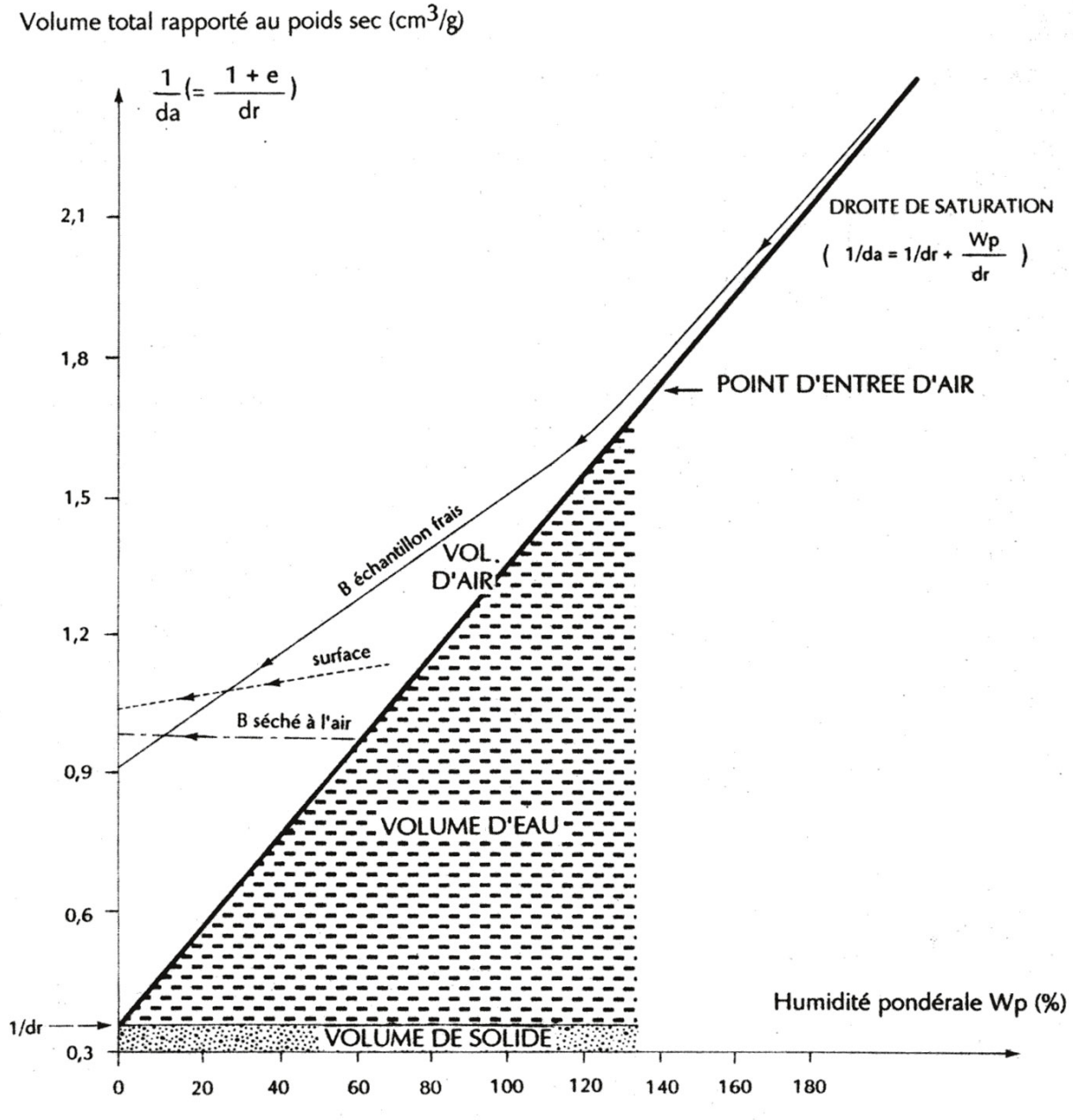
(.jpg)

9. Courbe de retrait en laboratoire
   Sur échantillons remaniés mais non séchés, VAKSMANN (1.987) a tracé la courbe de contraction en fonction de l'humidité pondérale (Fig. 6.19). Partant d'une pâte à la limite de liquidité, on dessèche progressivement le matériau et on mesure à chaque fois son volume total rapporté à son poids sec (invariant), c'est-à-dire la quantité 1 /da en cm3/g. On trace la courbe et on la compare à la droite de saturation, pour laquelle les contractions de l'échantillon ne représenteraient qu'un départ équivalent d'eau, sans entrée d'air.
   Cette droite de saturation a pour équation :

$$\frac{1}{da} = \frac{1}{dr} x(1 + Wp)$$

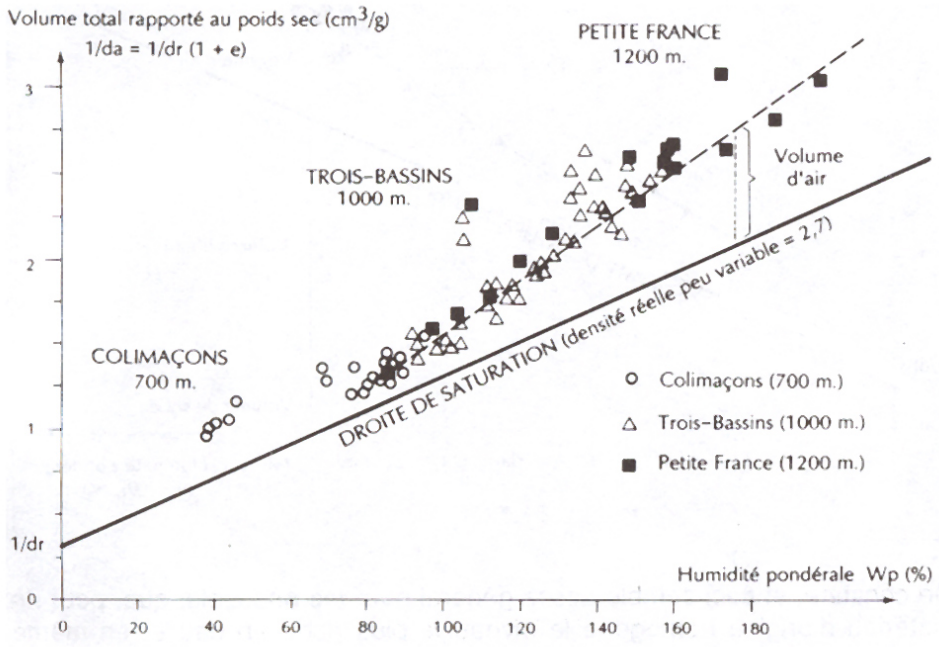
   dr est ici la densité réelle, égale en moyenne à 2,8. Jusqu'à environ Wp = 130 %, le retrait est parallèle à la droite de saturation. L'écart constant représente le volume d'air (environ 3 %?) inaccessible à l'eau, intimement enfoui dans les particules allophaniques.

FIG. 6.19 – *Courbes de retrait d'andosol de Trois-Bassins à 30 cm). Comparaison sur sol frais, sol séché à l'air et sol de surface (D'après M. Vaksmann 1.987)*



(.jpg)

FIG. 6.20 – *Courbe de retrait sur échantillons non remaniés de l'horiron B (40-100 cm) des andosols en fonction de l'altitude (700 à 1 200 mètres). Toposéquence ouest du Piton des Neiges (D'après Vaksmann 1.987)*

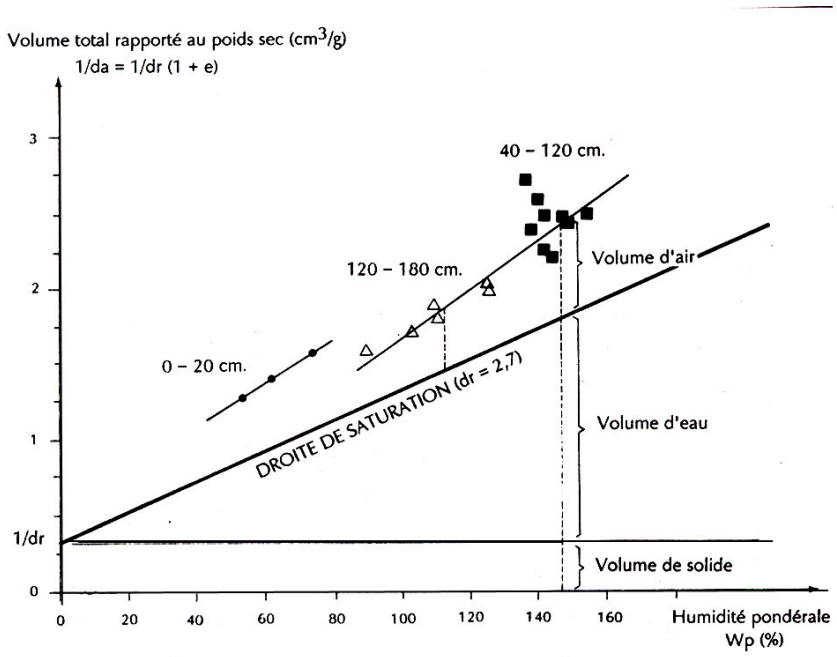


(.jpg)

A partir de 130 % d'humidité pondérale, la courbe s'écarte de la droite de saturation (c'est-à-dire que le rythme de la contraction diminue). L'air commence à rentrer dans l'échantillon et augmente régulièrement de sorte que la diminution du volume total est inférieure au départ d'eau. Les points s'alignent sur une droite jusqu'au séchage à l'étuve à 105 ° C. On n'observe pas, à l'opposé des sols «classiques», de limite de retrait (humidité en dessous de laquelle il n'y a plus de diminution de volume). Le matériau se réorganise par vidange et effondrement de ses différentes porosités emboîtées (voir plus loin) les unes après les autres, sans qu'il y ait de stabilisation du processus. Les andosols ont donc une capacité de retrait importante, en tout cas tant qu'ils n'ont pas subi de dessiccation irréversible. En effet, si on trace sur le même graphique les courbes relatives à l'horizon de surface (0-30 cm) et à un échantillon profond séché à l'air, on s'aperçoit, d'une part qu'ils ne sont plus humectables en deçà de 60 % d'humidité pondérale, d'autre part qu'ils ne montrent pratiquement pas de retrait. Ces matériaux ont perdu leur rôle d'éponge, par réorganisation structurale irréversible aboutissant à ta formation de granules et poussières très stables (voir plus loin)et hydrophobes. Au champ, les éventuelles variations de volume et, par répercussion, de microtopographie, seront donc le fait des horizons situés entre 30 et 100 cm de profondeur. Dans cette tranche peuvent se produire des variations significatives d'humidité pondérale (pour qu'il y ait impact volumétrique), sans pour autant que la succion atteigne pF4, seuil de déshydratation irréversible. Par exemple entre 50 cm et 75 cm de profondeur, la variation de volume pourrait théoriquement atteindre 10 à 15 % si la courbe de retrait réalisée sur sol «en vrac» était comparable à celle qui serait faite sur échantillon non remanié, ce qui, avec le protocole disponible n'est pas réalisable.

10. Relations «densité apparente - humidité pondérale - volume d'air en conditions naturelles»
    Pour comparaison, sur le même système de références (1 /da - Wp %), VAKSMANN a reporté les coordonnées réelles d'échantillons d'horizon B (40 - 100 cm) non remaniés prélevés entre 700 et 1 200 mètres sur le versant ouest (Fig. 6.20).

FIG. 6.21 – *Retrait (relation Wp-1/da) sur un profil d'andosol de Trois-Bassins (100 mètres).(Echantillons non remaniés)*

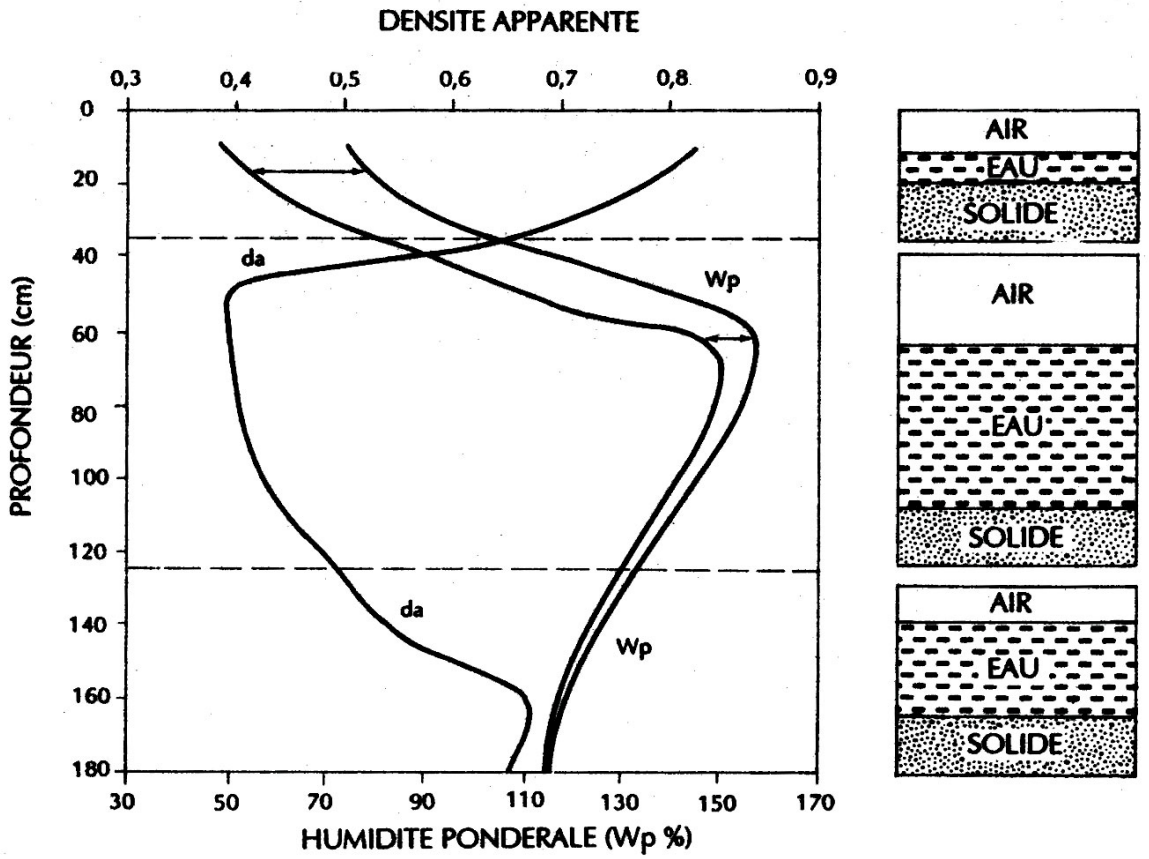


(.jpg)

On constate que l'humidité pondérale naturelle augmente avec l'altitude et qu'en même temps la densité apparente diminue. Si on compare la proximité des points à la droite de saturation (en supposant dr invariant proche de 2,7, ce qui en réalité n'est pas le cas), on constate que plus on monte en altitude, plus les points représentatifs s'écartent de cette droite ; cela voudrait dire que le volume d'air rapporté à un même poids de solide augmente régulièrement avec l'altitude. Ces caractéristiques sont en relation avec le gradient pédogénétique : augmentation régulière avec l'altitude de la proportion de gels allophaniques par rapport aux halloysites et d'hydroxydes de fer amorphes par rapport à la goethite.

Maintenant, pour un même profil, toujours sur les mêmes axes de références, il est intéressant de comparer les positions des points représentatifs pour différentes profondeur (Fig. 6.21).

FIG. 6.22 – *Allure des profils de densité apparente et d'humidité pondérale dans les andosols sur cendres du Piton des Neiges (D'après M. Vaksmann 1.987)*



(.jpg)

On constate, et ceci semble assez général pour les andosols, que, pour un matériau d'origine homogène le niveau le plus riche en eau et en même temps en air est environ 30-100 cm. C'est aussi le niveau le plus «léger», où la densité apparente est la plus faible. Le profil de variations de ces paramètres est indiqué sur la figure 6.22.

Cette différenciation systématique entre 30 et 100 cm, peu décelable à l'observation directe, semble être un caractère pédogénétique des andosols sur cendres du Piton des Neiges.

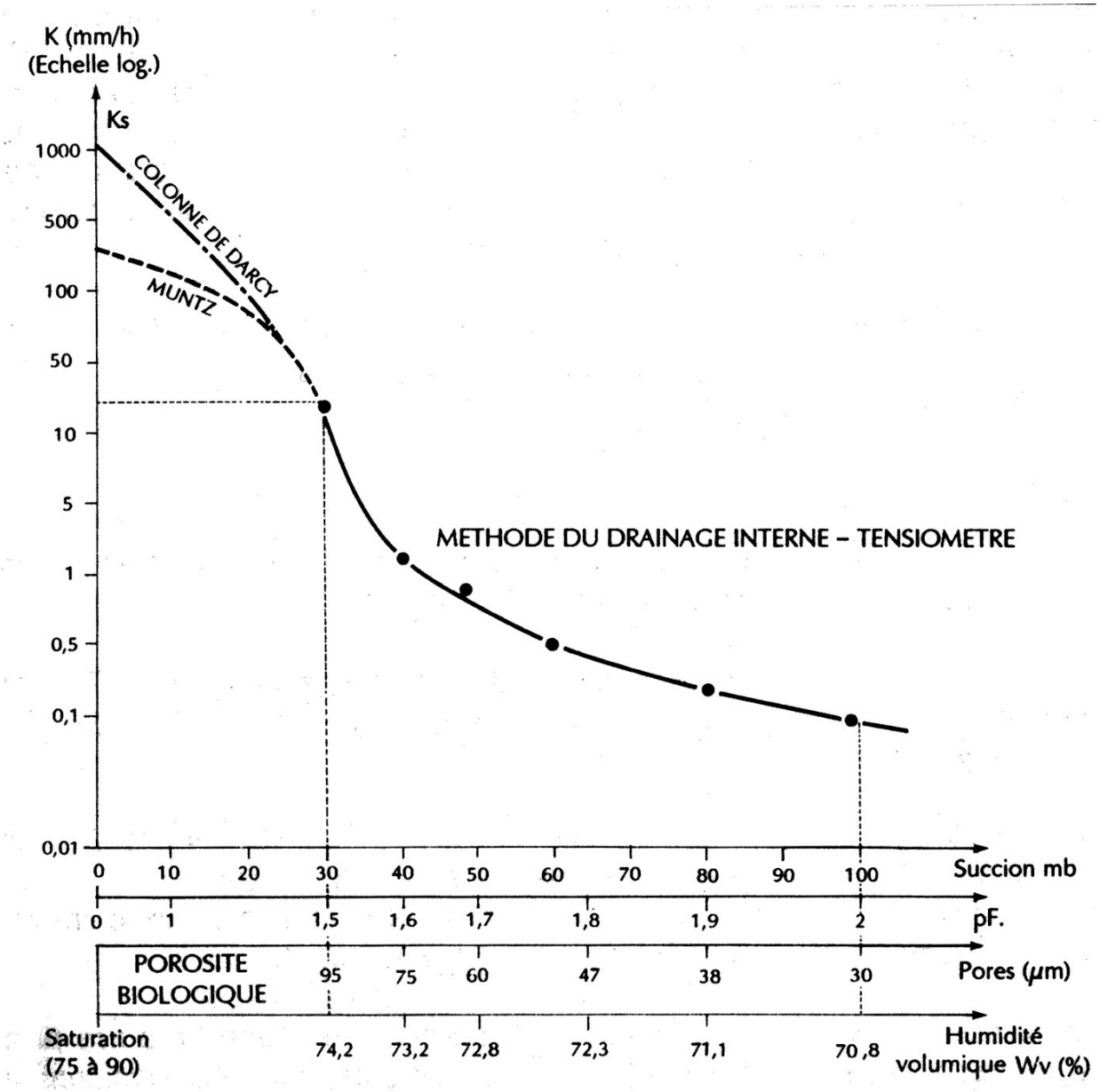
11. Conductivité hydraulique

Si on la mesure en surface par le dispositif «Muntz - double anneau», la perméabilité des andosols est toujours très élevée. C'est une de leurs caractéristiques. Cette perméabilité peut atteindre 500 mm/h à saturation (vitesse d'infiltration stabilisée). Il est probable qu'elle atteigne ou dépasse 1 m/h sur «colonne de DARCY» (drainage libre) à saturation.

Sous végétation naturelle ou vieille jachère, il n'y a pratiquement pas de ruissellement sur les andosols et donc pas d'érosion. Ceux-ci apparaîtront dès que l'état de surface sera modifié (travail du sol mal adapté, fort dessèchement, dénudation...).

Maintenant, si on considère (Fig. 6.23), par la «méthode du drainage interne» (avec mesures tensiométriques) la courbe K-pF, on s'aperçoit (S. JOUVE, 1.984) que le premier point de mesure possible ne peut être en dessous de pF1,5 (30 mb), qui correspond à la porosité inférieure à 100 μm. A ce moment la conductivité hydraulique est de l'ordre de 23 mm/h. Le Muntz donnant jusquà 500 mm/h à saturation, on en conclut que les plus forts débits entre pF0 (saturation) et pF 1,5 sont le fait de la «porosité biologique» (pores supérieurs à 100 μm). Quand la succion croît au-dessus de pF 1,5, la conductivité décroît très vite ; à pF2 (100 mb), correspondant aux pores inférieurs à 30 μm, la conductivité hydraulique est proche de zéro. La courbe K - pF (in situ) monte brusquement en dessous de pF 1,6 dès que l'eau circule dans les pores de dimension supérieure à 75 ftm. De pF 1,5 à pF 0 (saturation) on passe de 23 mm/h à plusieurs centaines de mm/h (Ks) correspondant à la circulation de l'eau dans les macropores, supérieurs à 100 μm, qui pourtant paraissent représenter bien moins de 10 % de la porosité totale.

FIG. 6.23 – *Conductivité hydraulique en fonction du potentiel capillaire sur un andosol de Trois-Bassins (95 cm) (D'après Jouve - 1.984*



(.jpg)

12. Minéralogie

Les travaux de V. ROSELLO (1.984) et de L. DENAIX (1.989), sur ces sols de la Réunion ont contribué à mieux cerner leur composition minéralogique. Pour cette reconstitution ont été mises en oeuvre des techniques différentes et complémentaires :

- diffraction des rayons X (pour les minéraux les mieux cristallisés),
- analyses thermiques,
- microscopie électronique à transmission (morphologie des constituants amorphes)
- extractions chimiques par l'oxalate d'ammonium à pH 3,5 (pour les amorphes).

De ces recherches, il ressort, comme on s'y attendait, que les composés minéraux de la matrice fine colloïdale (plasma) de ces sols sont en majorité des produits «amorphes» ou cristallisés à très courte distance (paracristallins), à base de silice, d'aluminium et de fer. Ainsi, en dessous de l'horizon de surface (0-30 cm), la composition du plasma est en moyenne la suivante

- alumino-silicates «amorphes» (aux rayons X) c'est-à-dire «allophanes» au sens large 20-40%
- Hydroxydes de fer amorphes (ferrihydrite ?) 10-20%
- Gibbsite 20-40%
- Goethite (+magnétite + maghemite) 10-25%
- Halloysite 5-10

La matière organique, dans ces sols, toujours en proportion importante (6 à 15 % dans l'horizon «B»), serait essentiellement sous la forme d'acides fulviques (lixiviés à partir de l'horizon de surface), associés sous forme très stable, aux composés amorphes (allophanes) et aux hydroxydes métalliques (chélates). Une grande partie de cette matière organique, inaccessible à la minéralisation, est enfouie dans les structures emboîtées (sans qu'on sache comment) et protège ainsi efficacement les amorphes d'une éventuelle tendance à la cristallisation.
Les «allophanes» ont pu être différenciées, grâce à l'observation en microscopie électronique à transmission, en 2 minéraux :

- l'allophane (sensu stricto),
- l'imogolite.

En MET, on constate que ces minéraux ne sont pas vraiment amorphes, mais «cristallisés à courtes distances» (HERBILLON, 1.983).

- l'allophane apparaît sous forme de globules sphériques d'environ 250 Åde diamètre, composés d'amas de sphérules élémentaires creuses de 35 à 55 Åde diamètre.
- l'imogolite, minéral le mieux défini (YOSHINAGA et AOMINE, 1.962), est formée de filaments enchevêtrés de 50 à 100 Åde section, longs de plusieurs microns. Ils sont formés de tubes élémentaires creux d'environ 10 Åde diamètre interne et 20 Åde diamètre externe.

Ces globules et sphérules d'une part, filaments et tubes d'autre part, développent des microporosités emboîtées : intra et inter-sphérules, intra et inter tubes, qui participent, aux niveaux les plus fins comme nous le verrons, à la porosité du matériau dans son ensemble.
Du point de vue structural, ces deux constituants paracristallins sont différents :

- l'allophane, sphérique, est formée d'une seule couche octaédrique aluminique, enrobant une couche silicique tetraédrique incomplète. L'intérieur (10 Åde diamètre) serait creux. Son rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 est compris entre 1 (allophane alumineuse) et 2 (allophane siliceuse). Cela correspond à un degré de polymérisation croissant (HEMNI, 1.981). Lorsque ce rapport approche 2, cela la rend proche de l'halloysite et peut annoncer sa formation à plus basse altitude (travaux de BRINDLEY et FAUCHER 1.969, HEMNI et WADA 1.976, PARFITT et HEMNI 1.980). Enfin, WADA (1.977) parle également d'«allophane-like», avec un rapport SiO_2/Al_2O_3 variant entre 0,2 et 1, qui pourrait être plus proche de constituants organo-minéraux au sens strict.

– l'imogolite, tubulaire, est également organisée en 2 plans, formés d'une couche aluminique gibbsitique qui enveloppe une couche tétraédrique silicique plus ou moins complète. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est alors proche de 1 (travaux de CRADWICK, FARMER, RUSSEL, MASSON, WADA, YOSHINAGA, 1.972). L'imogolite est donc généralement plus pauvre en silice que l'allophane.

La MET permet aussi d'observer la morphologie de l'halloysite (quand elle existe), soit sous forme de glomérules (0,1 pm de diamètre), soit sous forme tubulaire (de 0,5 pun de long). On observe aussi des micro-cristaux ovoïdes de gibbsite (0,1 à 0,2 Nxn) et des micro-aiguilles de goethite (0,05 gm).

- Variations minéralogiques relatives dans les profils

Le matériau pyroclastique d'origine pouvant globalement être considéré comme de composition et d'âge identiques dans toutes les situations, les variations observables dans la composition minéralogique sont le fait des 4 variables, non indépendantes, suivantes :

– la pluviométrie,
– la longueur de la saison sèche (liée à l'exposition et à l'altitude),
– la teneur et la forme de la matière organique (liée à l'altitude),
– la circulation différentielle des eaux de drainage dans les lits cendreux ou tuffeux. D'une situation à une autre cette disposition des lits peut être considérée comme aléatoire.

a) Variations en fonction de l'altitude

Sur le versant ouest, où la toposéquence est la plus différenciée et la mieux connue, entre 700 à 1 400 mètres d'altitude, domaine des andosols désaturés non perhydratés, la pluviométrie augmente de 1 200 à 1 500 mm ; il en est de même pour l'humidité ambiante et inversement pour le déficit hydrique (P-ETP) ; la température moyenne annuelle décroît de 20 ° C à 16 ° C. Ces caractéristiques influent sur le drainage global (et donc sur l'entrainement préférentiel de la silice), sur la composition et la forme de la matière organique. Le taux de matière organique croit avec l'altitude, ainsi que la proportion relative des acides fuiviques par rapport aux acides humiques (ZEBROWSKI, 1.975). Or les premiers sont plus aptes à migrer en profondeur (associés à l'aluminium et au fer) que les premiers.

Dans le bas de la zone, le climat et les moindres proportions de matière organique liée aux amorphes permettent la cristallisation d'une certaine quantité d'halloysite. En rétroaction, la présence d'halloysite diminue globalement les capacités de drainage du matériau et le rend plus vulnérable aux glissements sur les pentes. Ainsi plus on descend en altitude plus le matériau apparaît «remanié» : la litation disparaît, des blocs de «tuf jaune» ou de coulées peuvent s'y mélanger. On passe progressivement aux sols bruns andiques, domaine où la topographie bosselée tend à disparaître.

L'altitude croissante commande également

– une augmentation des hydroxydes de fer amorphes (et de ferrihydrite) par rapport à la goethite (cristallisée).
– une augmentation probable de l'imogolite (SiO_2/Al_2O_3 = 1), de l'allophane alumineuse, de l'«allophane-like» et des chélates d'aluminium par rapport à l'allophane siliceuse (SiO_2/Al_2O_3 = 2).
– concernant la gibbsite : celle-ci est toujours en quantité importante, mais plus l'altitude est élevée, plus elle semble se concentrer préférentiellement en bas de profil (ZEBROWSKI, 1.975) ; ceci est probablement le fait d'un entraînement préférentiel par les acides fuiviques au sein de complexes organo-aluminiques. Ce processus annonce déjà la podzolisation, qui peut apparaître au delà de 1 400 mètres d'altitude (unités 2, 3 et 36) ; ceci, ainsi que le lessivage de la silice, va dans le sens de la diminution du rapport SiO_2/Al_2O_3 avec l'altitude (0,5 à 0,6 de 800 à 1 100 mètres, 0,4 à 0,5 de 1 100 à 1 400 mètres).

b) Variations en fonction du litage des pyroclastites

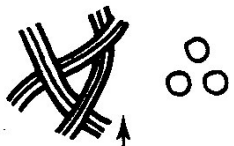
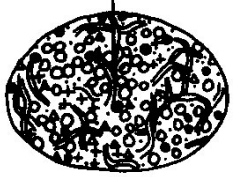
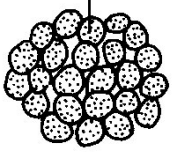
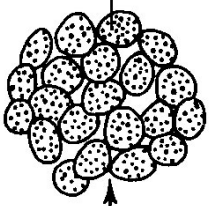
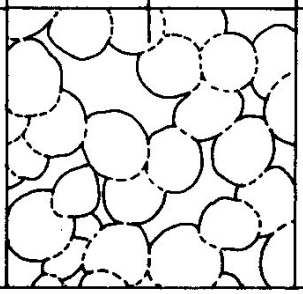
Localement, dans le détail, les coupes de pyroclastites, lorsqu'elles n'ont pas été remaniées par des glissements (plutôt au-dessus de 1 100 mètres d'altitude), peuvent montrer des différences de couleur et de morphologie

(photo A.36), accentuées par les processus différentiels de pédogenèse (migrations, enrichissements relatifs) ; ceux-ci sont commandés par les vitesses relatives de circulation des eaux de drainage :

- des lits plus sombres semblent plus riches en fulvates liés aux amorphes ou sous forme de chélates.
- des lits, qui apparaissent de teinte brun rouille, sont plus riches en hydroxydes de fer amorphes (ferrihydrites ?). Lorsqu'on passe aux andosols podzolisés (en altitude), entre les lits, ce fer donne de fins «horizons placiques» orangés localement indurés.
- des niveaux grisâtres, plus clairs, apparaissent au contraire lessivés en fer.
- certains lits, lorsqu'ils sont desséchés le long des tranchées, révèlent une forte concentration en «poupées» gibbsitiques, irrégulières et caverneuses, de teinte crème, de 1 à 30 mm de large, au sein de la matrice brune. Cette accumulation nous semble «relative» c'est-à-dire qu'elle serait la conséquence d'un fort déficit en silice favorisé par un drainage (oblique et vertical) plus rapide dans certains lits cendreux ; ce lessivage favoriserait l'individualisation et la cristallisation de l'alumine résiduelle en excès. Dans ces conditions, ces niveaux pourraient être plus riches en imogolite qu'en allophane.

Ces niveaux cendreux, différemment colorés, ont généralement 5 à 35 cm d'épaisseur. Le matériau le plus fréquent et qui forme les «couches» les plus épaisses est de teinte homogène, brun jaunâtre à brune et peut présenter une légère thixotropie. Morphologiquement, il ne montre pas d'accumulation particulière.

FIG. 6.24 – *Emboîtement des structures dans les andosols désaturés de la Réunion D'après V Rosello 1984*

ORDRE D'EMBOITEMENT (en descendant)	TAILLE DE "L'ELEMENT"	POROSITE DE "L'ELEMENT"	SCHEMA DE "L'ELEMENT"	CONSTITUANTS DE "L'ELEMENT"
PARTICULES ALLOPHANIQUES (ordre 4)	0.01–0.001 µm (10–100 Å)	5–10 Å ("intra 4")		- Allophane (sphérules) - Imogolite (tubes et filaments) - Hydroxydes amorphes - Gibbsite - Goethite - Complexes organo–métalliques - Halloysite
NANO AGREGATS (ordre 3)	0.1–1 µm	0.01–0.1 µm ("inter 4")		ELEMENTS D'ORDRE 4
ORDRE 2	5–10 µm	0.1–1 µm ("inter 3")		ELEMENTS D'ORDRE 3
ORDRE 1	50–100 µm	1–10 µm ("inter 2")		ELEMENTS D'ORDRE 2
MATERIAU NON SECHE A STRUCTURE CONTINUE	—	10–100 µm ("inter 1") et 100–1000 µm (biologique)		ELEMENTS D'ORDRE 1

(.jpg)

- au sein de ces niveaux d'origine purement cendreuse, s'intercale fréquemment une couche plus ou moins fragmentée de «tuf jaune» de 20 à 50 cm d'épaisseur et située à une profondeur variable entre 0,50 et 2 mètres. Ce matériau de teinte jaune pâle, est massif et compact à l'état desséché (friable en humide), non poreux et peu altéré. Il n'est pas sans rappeler les «talpetate» des pyroclastites d'Amérique centrale. Le tuf jaune est le seul matériau qui, n'ayant pu être digéré par l'altération, est resté presque intact depuis son dépôt (il y a environ 25 000 ans) : il comprend des débris de 2 à 30 mm de large, vitreux et ponceux, jaune clair (sans doute «palagonitisés»), ainsi que de petits fragments de feldspath (phénocritaux) ; le tout est emballé dans une matrice cendreuse consolidée. Ce tuf est peu altéré par rapport aux cendres. Il contient en effet environ 60 % de SiO_2 contre 15 à 25 % pour la matrice brune du matériau andique sur cendres. En supposant (compte tenu de leur synchronicité) que leurs compositions chimiques d'origine étaient comparables, on peut considérer que le «tuf jaune» n'a pas subi de desilicification par rapport aux cendres.

Propriétés micro-structurales et hydriques

V. ROSELLO (1.984) a étudié en microscopie électronique à balayage des échantillons non remaniés lyophilisés. Elle a ainsi pu mettre en évidence les relations dynamiques, au cours de la dessiccation (pF1 à pF6), entre l'organisation microstructurale, la porosité, la teneur en eau et la densité apparente du matériau andique. Celui-ci, soumis à des contraintes hydriques, subit des variations significatives, qui sont irréversibles à partir de pF4.

a) La microstructure : emboîtements successifs

Les andosols de la Réunion possèdent une microstructuration complexe emboîtée (Fig. 6.24) et, nous le verrons, évolutive lors des forts dessèchements.

Dans leur état d'humidité naturelle, les horizons (B) des andosols présentent une structure apparemment continue. On n'y observe pas d'agrégats macroscopiques ni aucune fissuration. Les éventuels macropores, d'une taille supérieure à 100 μm, sont d'origine biologique, animale ou végétale.

En microscopie optique, si le matériau apparaît continu, on s'aperçoit qu'il est constitué d'éléments subsphériques coalescents de 50 à 100 μm de diamètre ; ce sont des micro-agrégats de premier ordre, qui ménagent une micro-porosité polyconvexe de 30 à 100 μm de large.

En microscopie électronique à balayage, on voit que chaque micro-agrégat du 1 er ordre est assemblé en unités arrondies de 5 à 10 μm de diamètre. Ce sont des micro-agrégats de deuxième ordre. L'assemblage de ces microagrégats montre une porosité de dimension 1 à 10 μm.

Toujours en MEB, mais à très fort grossissement, on s'aperçoit que les micro-agrégats de 2e ordre sont eux-même composés d'objets de 3e ordre, d'aspect floconneux que l'on appelle des nano-agrégats élémentaires, dont la taille est de 0,1 à 1 μm. La porosité «inter-nano-agrégats» est cette fois de 0,1 à 1 μm.

Le MEB ne permet plus de voir distinctement la structure interne des constituants des nano-agrégats qui sont donc les constituants d'ordre 4 du pédo-plasma. L'analyse en microscopie électronique à transmission (MET) a seulement permis de voir la présence de filaments d'imogolite, de nombreux «grains diffus» et d'un certain nombre de grains sombres répartis de préférence en périphérie des nano-agrégats. Ces éléments ont des tailles comprises entre 10 et 100 Å. Les investigations faites par ailleurs sur la matrice globale (rayons X, MET, analyses thermiques diverses, extractions chimiques) permettent de proposer un modèle provisoire de la composition du nano-agrégat. Il serait constitué de l'association des différents éléments identifiés : fibres d'imogolite, sphérules d'allophane, gibbsite, hydroxydes de fer amorphe, goethite, complexes organo-métalliques, halloysite (en faible quantité).

On ne sait pas encore comment sont assemblées ces particules (constituants d'ordre 4 du matériau) dans les nano-agrégats ; il est certain que ces derniers présentent une porosité interne. Si on se réfère à la porosité des associations de fibres d'imogolite (formant des filaments) ou de sphérules d'allophane (globules) obervées par ailleurs (travaux de HENMI et WADA, 1.976 et 1.977), on peut estimer que la porosité interne aux nanoagrégats (donc entre les particules qui les composent) est comprise entre 0,01 et 0,1 pm (100 à 1 000 Å).

A un niveau de perception encore plus fin, on arrive à la constitution même des particules minérales et organo-minérales. On en a quelque idée concernant les éléments cristallisés (cristaux ovoïdes de gibbsite, glomérules d'halloysite, aiguilles de goethite) ; l'imogolite (en fibres) et l'allophane (globulaire) sont maintenant relativement connues. La fibre d'imogolite, longue de quelques μm est creuse (diamètre interne d'environ 10 Å, diamètre externe de 20 Å). La sphérule d'allophane, creuse également, à un diamètre extérieur de 35 à 55 Å. Ces éléments auraient une porosité interne de 5 à 10 Åde large. Allophane et imogolite ont donc des surfaces spécifiques très élevées, leur conférant des «réactivités» de surface importantes des points de vue physico-chimique, hydrique et rhéologique.

Concernant les complexes organo-métalliques et les hydroxydes de fer siliceux amorphes (ferrihydrites), on connait très mal leurs structures.

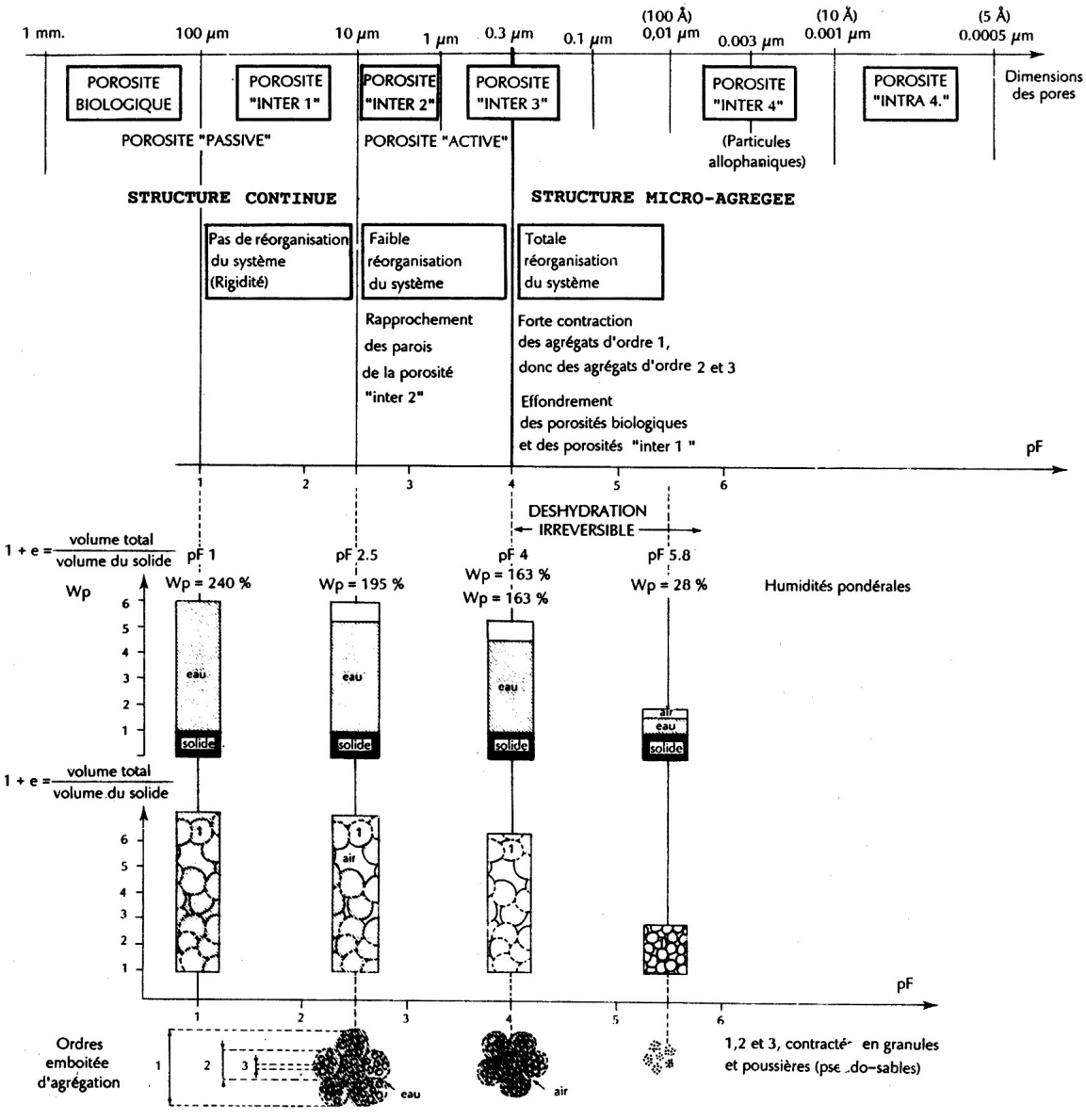
La figure 6.23 résume les tailles des différentes microstructures et porosités associées, emboîtées.

Le schéma précédent est probablement trop simpliste. Les nano-agrégats qui confinent les particules élémentaires, voisinent avec des «éléments libres» ou des amas «purs» de tailles et formes diverses, de ces particules (imogolite, allophane). Le tout est «noyé» et reste assemblé par l'eau, différents gels non organisés et des liants organiques. Reste en suspens justement le rôle de ces fractions organiques dans le maintien des divers emboîtements micro-structuraux : comment se répartissent ces fractions, en fonction de leur degré d'évolution et de leur âge, quelles sont celles susceptibles de migrer, quels sont leurs modes d'association avec les produits amorphes, quelle est leur accessibilité par la micro-flore minéralisatrice et nitrifiante ?. Ces aspects, à fortes implications agronomiques, devraient être le domaine privilégié de recherches approfondies ultérieures.

b) L'évolution des microstructures sous l'effet de contraintes hydriques

A la Réunion, cet aspect a été étudié par V. ROSELLO (1.984) de façon expérimentale et dynamique, grâce à un appareillage spécifique (TESSIER, 1.984) permettant de travailler sur des échantillons non remaniés qu'on soumet à des pF s'étalant de 1 à 6 et sur lesquels on mesure les variations de la teneur en eau pondérale (Wp %), du volume apparent, de la densité apparente (da), de l'indice des vides e (volume des vides rapporté au volume de solide) et de l'indice d'eau v (volume d'eau rapporté au volume de solide). Les différents types de porosités emboîtées sont mises à contribution successivement selon l'intensité de la dessiccation (Fig. 6.25).

FIG. 6.25 – *Dynamiques simultanées de l'agrégation emboîtée, de son système poral et du vidage des pores au cours de la dessiccation. (D'après Rosello 1.984)*



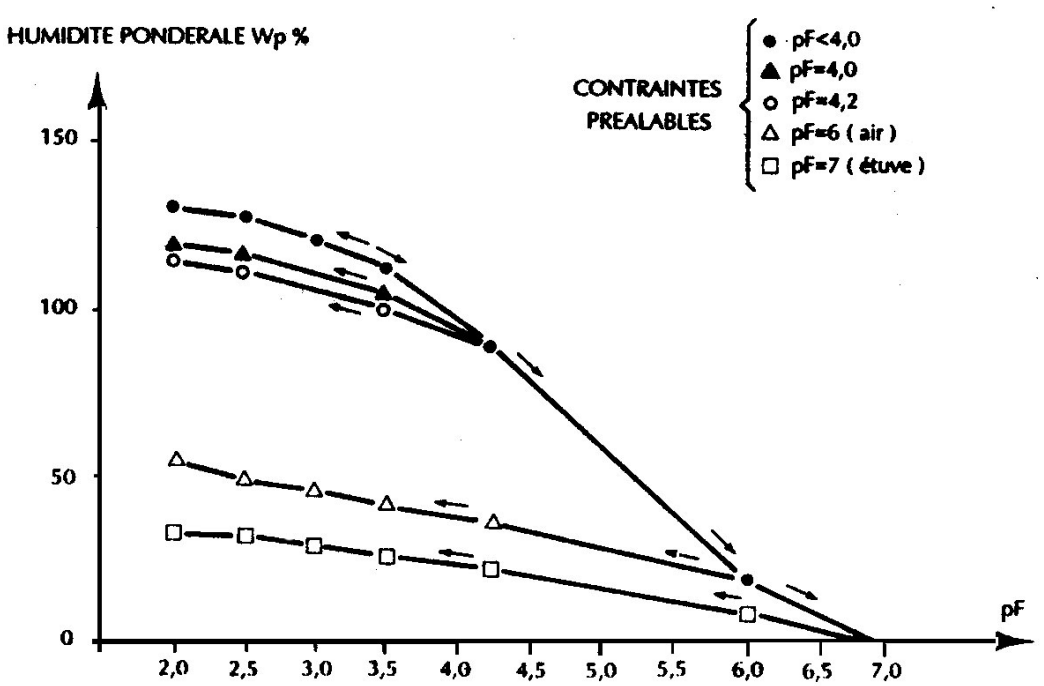
(.jpg)

Le matériau est saturé d'eau (Wp = 150 à 250 %). Sa densité apparente est comprise entre 0,4 et 0,5. L'indice des vides est maximum (e = 4 à 5,3).

- De pF 1 à pF 2,5 L'eau comprise dans les pores de taille supérieure à 10 pm (porosité biologique et porosité «inter 1 ») s'évacue. La densité apparente et l'indice des vides varient peu. L'édifice reste rigide ; a pF 2,5, il reste encore 110 à 200 % d'eau pondérale. On peut alors qualifier la porosité qui se vide ou se remplit entre ces 2 pF, de «porosité passive».
- De pF 2,5 à pF 4 L'eau des pores dont la taille est comprise entre 0,3 et 10 N.m se vide ; il s'agit donc de la porosité «inter 2» et d'une partie de la porosité «inter 3». Il y a alors un retrait volumique assez significatif par rapprochement des parois des pores inférieurs à 10 gm qui se vident, et, par répercussion, diminution de la taille des micro-agrégats d'ordre 2. De ce fait, la porosité inférieure à 10 N.m peut être appelée «porosité active» dans le cadre du fonctionnement naturel de ces sols. A pF 4, le volume poral du matériau est de 14 inférieur au volume total initial (pF 1 à 2,5). La structure d'ensemble du matériau reste continue. Toujours à pF 4, l'eau pondérale restante est de 80 à 160 % et retenue dans les pores inférieurs à 0,3 um. L'indice des vides (e) est de l'ordre de 4 et la densité apparente comprise entre 0,5 et 0,6.
- De pF 4 à pF 5,7 Dans cet intervalle (conditions non naturelles pour ces sols), il se produit un important retrait. L'eau qui part concerne l'eau des pores compris entre 0,003 gm (30 h) et 0,3 μm, c'est-à-dire le restant de la porosité «inter 3» et une partie de la porosité inter-particules («inter 4»).
- De pF 4 à pF 5,8, le matériau perd environ 79 % de son volume poral. L'indice des vides (e) est alors aux alentours de 1 . La densité apparente passe à 1,1 environ.
  Ce retrait affecte la taille des nano-agrégats (ordre 3) et par conséquent des micro-agrégats d'ordres 2 et 1 . La structure macroscopique continue du matériau dans son ensemble est déstabilisée et s'effondre ; elle passe à une structure agrégée en «pseudo-sables», telle qu'on peut la voir quand ce matériau est séché à l'air. Tous les éléments se contractent et sont susceptibles de se séparer puisqu'il n'y a plus d'eau entre eux pour les retenir. On peut arriver à une poussière de minuscules pseudo-sables hydrophobes. Il y a donc, de pF 4 à pF 5,7 une totale réorganisation du système emboîté.
- A pF 5,8, il reste encore 20 à 30 % d'eau pondérale très fortement retenue, logée dans la porosité intra-particules («intra 4») en particulier intra-tubes d'imogolite et intra-sphérules d'allophane.

Autre phénomène important déjà signalé : à ce stade la réhydratation et donc le «regonflement» du matériau jusqu'à l'état initial sont impossibles (Fig. 6.26). Les auteurs situent ce seuil de «non retour» entre pF 4 et pF 5. Ce sont les phénomènes d'hydrophobie et de deshydratation irréversible, caractéristiques essentielles de ce type d'andosol. Ils ne se produisent pas dans les conditions naturelles de formation de ces sols, sinon ils ne seraient pas ce qu'ils sont. Seule l'action anthropique (mécanique et désséchante) peut les dégrader à ce point et les rendre alors ultra-érodibles (photo A.38).

FIG. 6.26 – *Influence de la dessiccation préalable sur la rétention de l'eau seuil de réversibilité (Andosol de Trois-Bassins - horizon B)(D'après S Perret 1.990)*



(.jpg)

Il est possible qu'à ce stade les particules d'allophane et d'imogolite soient déjà atteintes dans leurs structures cristallines.

Compte tenu de ces importantes réorganisations internes, on comprend que les propriétés naturelles des andosols, autant physiques que physicochimiques, soient très différentes quand on les observe ou mesure après dessiccation à l'air. Le matériau n'est en effet plus le même et en particulier, toutes ses propriétés de réactivité de surface sont différentes. L'échantillon prélevé doit donc être conservé dans son état d'humidité initiale. En effet, comme nous l'avons vu, l'eau comprise dans les pores inférieurs à environ 0,1 um fait partie intégrante du matériau andique. Si on l'enlève artificiellement, on aboutit à un matériau différent qui n'est plus celui d'un andosol.

c) L'effet des contraintes mécaniques

Les andosols posent des problèmes d'ordre géotechnique (portance, compaction, perte; de perméabilité). Il est donc intéressant de voir expérimentalement ce qui se passe quand on applique à l'échantillon des contraintes mécaniques contrôlées. Ces aspects ont été abordés séparément par V. ROSELLO (1.984), M. BROUWERS (1.985) et S. PERRET (1.989).

- V. ROSELLO (1.984) a fait, en liaison avec le laboraroire de la DDEA.3 de Saint Denis, des essais de compactage progressif d'échantillons non sechés et non remaniés, en assurant leur vidange. Ces échantillons ont été observés en microscopie optique et en MEB. On a ainsi pu constater qu'un tel compactage entraîne une modification de la porosité :

- la macroporosité (dite «biologique», 100 um à 1 mm) et la porosité «inter 1 » (10 - 100 N.m) sont les premières touchées. Ces 2 classes porales (16 % de la porosité totale) disparaissent vite. Or ce sont celles qui assurent l'infiltration rapide et l'alimentation hydrique des végétaux.
- la distribution porale inférieure à 10 pm est modifiée, bien que son volume total reste le même. Les pores de 0,3 à 10 μm à l'origine, diminuent nettement de taille et passent, pour la plupart, dans la classe 0,1 - 0,3 μm. Les pores inférieurs à 0,3 N.m restent inchangés.

Il en résulte, qu'une fois compacté, le matériau ne peut libérer son eau que sous une succion supérieure à pF 4. Cette eau est donc très peu disponible pour les plantes. D'autre part, l'infiltration absorbant les pluies intenses, qui, normalement, est conduite par les pores supérieurs à 10 pm, ne peut plus être assurée, ces pores ayant disparu. Il risque d'y avoir ruissellement et érosion rapides. Il est probable aussi que le volume d'air et la perméabilité à l'air diminuent fortement jusqu'à arriver en dessous du seuil d'aération suffisante pour les racines.

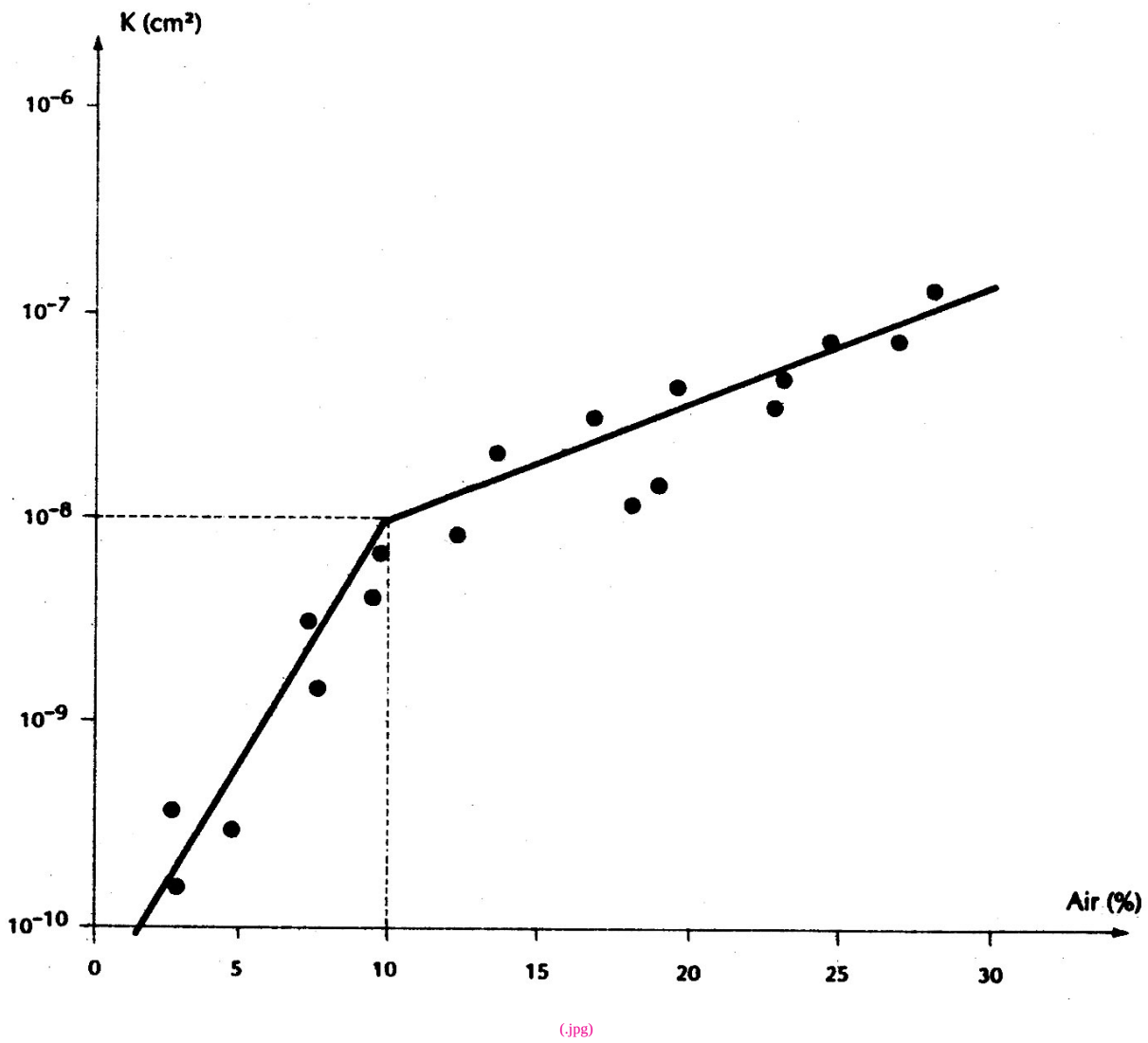
- Cet aspect a été abordé par M. BROUWERS et M. FORTIER (1.985) : les auteurs ont travaillé sur des échantillons remaniés, mais non desséchés et amenés à la densité apparente mesurée in situ. L'expérience consistait à mesurer pour différents pF initiaux, en fonction de pressions croissantes exercées, l'évolution du pourcentage d'air et de la «perméabilité intrinsèque» à l'air. Les mesures ont été faites sur des matériaux logés dans des cylindres de 100 cm3 fermés en bas (mais avec drainage possible), sur lesquels on exerçait pendant 5 minutes des pressions axiales de 1,27 bar, 2,55 bars, 3,82 bars, 5,09 bars, se rapprochant donc des pressions appliquées lors de passages d'engins agricoles. La «perméabilité intrinsèque à l'air» est définie par l'expression

$$Ki = \frac{V.n.I}{P.A.t}$$

avec :

- V = volume d'air qui traverse l'échantillon, en cm^3
- P = pression d'air dans la cellule, en din/cm^2
- n = viscosité de l'air, en din/sec/cm^2
- A = surface de l'échantillon en cm^2

FIG. 6.27 – *Relation perméabilité à l'air (W)- taux d'air (Andosols de la Réunion)(D'après Brouwers et Fortier-1.985)*



(.jpg)

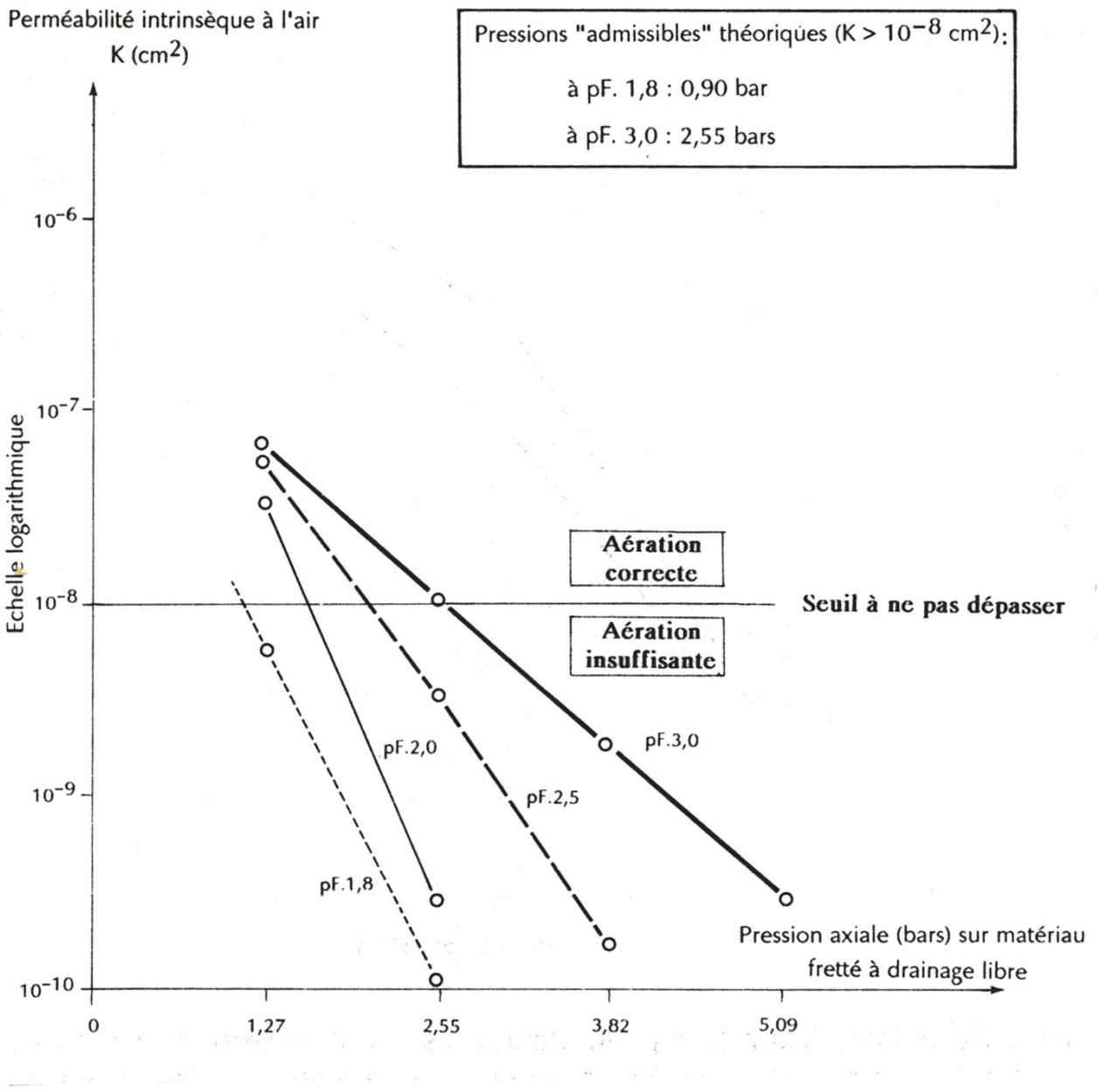
– I = hauteur de l'échantillon en cm
– t = temps, en sec.

Ki a donc une dimension de surface et s'exprime en cm^2.

Les auteurs ont remarqué que, toutes pressions et pF de départ confondus, Ki et volume d'air étaient bien corrélés. En particulier, avec 10 % d'air (seuil admis, en dessous duquel le développement racinaire est très faible), on a une perméabilité intrinsèque à l'air de 10-7 cm2 (Fig. 6.27).

Les résultats des essais pour un andosol de Trois-Bassins (10-40 cm) sont présentés sur la figure 6.28.

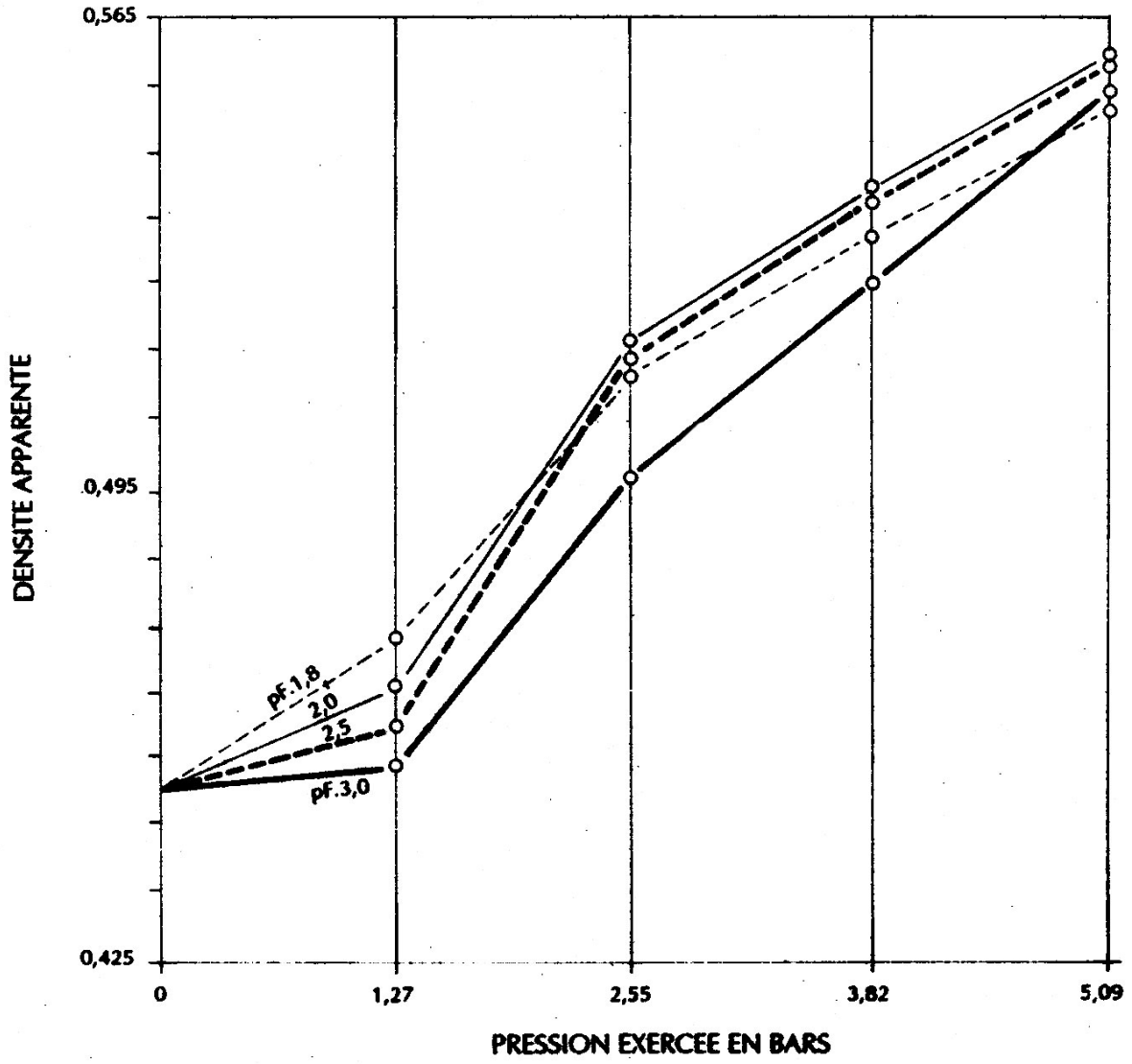
FIG. 6.28 – *Relation perméabilité intrinsèque à l'air-pression exercée pour différents états hydriques initiaux. (Andosol de Trois Bassins 10 - 40 cm) (D'après Broumers et Fortier 1.985)*



(.jpg)

Si l'on part d'un pF 1,7 correspondant à une humidité pondérale de 150 on voit donc que la pression maxima admissible, pour que le volume d'air reste supérieur à 10 % et donc qu'en même temps la perméabilité à l'air soit supérieure à 10-7 cm2, est ici de 0,90 bars. Cette pression n'engendre pourtant qu'une réduction de densité apparente de seulement 4,7 % (Fig. 6.29). A pF 3 on peut aller jusqu'à 2,90 bar, c'est-à-dire multiplier la contrainte par 3. La diminution de densité apparente par rapport à l'état initial est alors de 13,5 %. Ces valeurs peuvent être appelées limites de «traficabilité» théorique.

FIG. 6.29 – *Relation densité apparente-pression exer- cée pour diffférents états hydriques initiaux (Andosol de Trois-Bassins 10-40 cm) D'après M. BROUWERS et M. FORTIER -I985-*



(.jpg)

Pour comparaison, à la même profondeur, un sol brun andique (en dessous de 600 mètres d'altitude) possède, pour les deux mêmes pF, des limites de traficabilité bien supérieures : de l'ordre de 2,6 bars (au lieu de 0,9) pour pF 1,7 et 4,20 bars (au lieu de 2,90) pour pF 3,0. A ces 2 limites, correspondent respectivement des réductions de densité apparente de 11 % et de 24 %.

Par rapport à un sol «normal» (à argiles phylliteuses), l'andosol parait donc en laboratoire beaucoup plus sensible au compactage. Les conditions réelles sont cependant différentes des conditions des tests mentionnés ci-dessus. Ceux-ci sont réalisés en cylindres, empêchant la dissipation latérale de la pression appliquée et provoquant des frottements le long des parois, ce qui n'est pas le cas in situ, où, d'autre part, la dynamique de compactage est très variable, par rapport aux 5 minutes des tests.

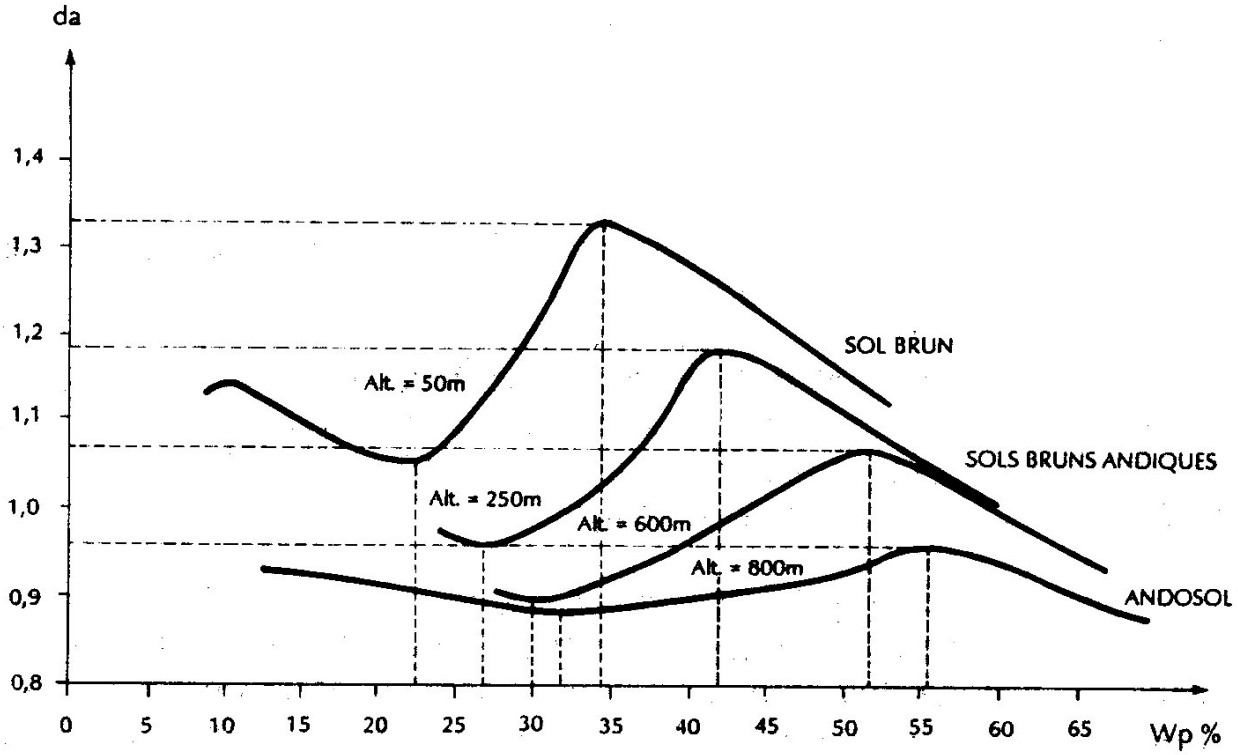
Concernant la dissipation latérale dans le milieu, il semble que les andosols transmettent beaucoup mieux les pressions que les sols bruns, comme en témoignent les observations empiriques courantes : en effet sur andosol, les ébranlements brutaux sont ressentis par les pieds de l'observateur 20 à 50 mètres de leur point d'application, ce qui n'est pas le cas pour les autres sols. Le matériau andique parait donc être, au moins latéralement et lorsqu'il n'est pas remanié, un milieu transmissible qui absorbe, dissipe et répartit bien et loin les pressions dynamiques. Ces constatations modulent donc fortement les conclusions faites en milieu fretté où la contrainte latérale imposée bloque la dissipation et où le remaniement du sol a démoli sa cohérence et donc son aptitude à la transmission des pressions. Un autre processus peu étudié et peut-être non négligeable est le phénomène d'élasticité du matériau non remanié et le temps de relaxation nécessaire pour la récupération naturelle, complète ou partielle, de son état initial, ceci en fonction de son humidité d'origine.

Comme pour les propriétés hydriques et physico-chimiques, il faut donc être très prudent concernant les conclusions à tirer de tests et mesures «rhéologiques» faites sur un échantillon d'andosol isolé de son contexte et supposé plus ou moins «reconstitué. Plus que pour tout autre matériau, il faut, dans la mesure du possible, privilégier les expérimentations au champ.

« Toujours dans le domaine des tests géotechniques, en laboratoire et sur échantillons en vrac, mais préalablement séchés, des essais de compactage dynamique ont été réalisés par S. PERRET (1.988). Le test «PROCTOR» simule le compactage en appliquant au matériau, à différentes humidités pondérales, une énergie donnée (ici 140 ki/m3 équivalente à l'énergie exercée sur le sol par une récolte mécanique de canne à sucre). Cette énergie est appliquée en chocs successifs brutaux sur trois couches superposées, par chute d'une dame (3 fois 22 coups). On note pour chaque humidité pondérale la densité apparente et on construit la courbe Wp - da qui, suivant les types de matériau, prend des formes caractéristiques.

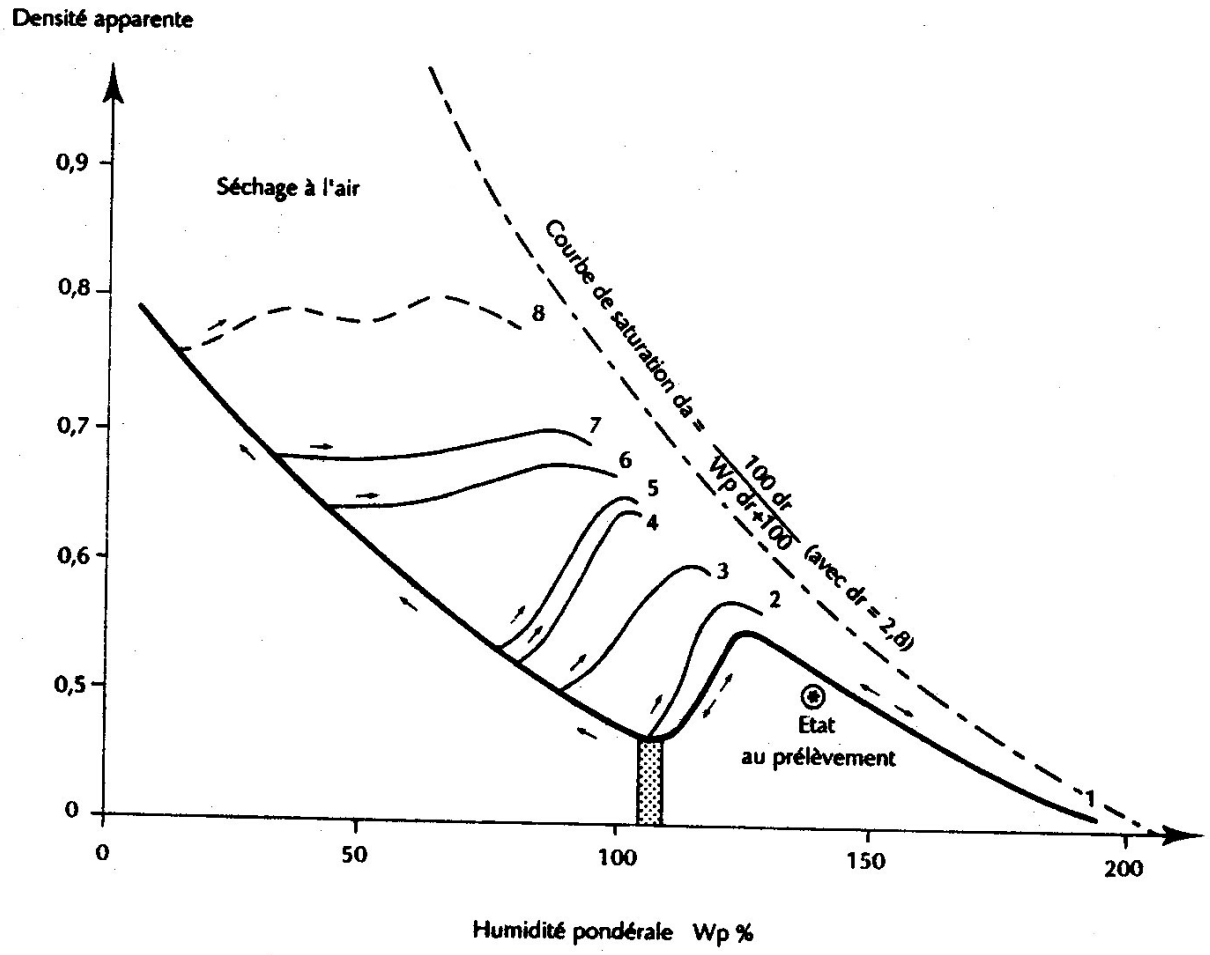
« La figure 6.30 montre 4 courbes obtenues sur une toposéquence, depuis le sol brun (50 mètres d'altitude) jusqu'à l'andosol (800 mètres). Dans le test PROCTOR, la «sensibilité au compactage» est appréciée, relativement à la pente de la courbe ascendante, à la valeur de la densité apparente maximum (da max) et à la valeur de l'humidité pondérale correspondante Wo («humidité optima de sensibilité»). La sensibilité au compactage est d'autant plus élevée que les deux premières valeurs sont élevées et que la troisième est faible. La comparaison des courbes nous donne une bonne relation «altitude (type de sol) - sensibilité au compactage». L'ordre de sensibilité décroissante est le suivant : Sols bruns –> sols bruns andiques –> andosols. Pour ces derniers la da - max est inférieure à 1 et Wo supérieure à 50 %. Donc quantitativement, la sensibilité au compactage des andosols paraît faible, alors que qualitativement les tests précédents indiquaient plutôt une grande sensibilité.

FIG. 6.30 – *Courbes Proctor sur la toposéquence de Bérive du sol brun (50 m) à landosol (800 m) (D'après Perret - 1.988)*



(.jpg)

FIG. 6.31 – *lnfluence du séchage sur le comportement au compactage dynmnique test Proclor harizor: 7 d'andasol de Trou-Bassins. (Daprès Perret-/990)*



(.jpg)

« Cependant, le test PROCTOR, comme les précédents, est un indicateur très relatif pour les andosols, puisque ceux-ci sont remaniés et desséchés préalablement. On obtient des informations différentes et mêmes contradictoires sur des échantillons moins desséchés (Fig. 6.31). D'autre part, ici, la sensibilité au compactage n'est pas considérée du point de vue de la plante contrairement au test précédent (BROUWERS et FORTIER) qui prend en compte les paramètres d'aération.

« Ces tests sont donc complémentaires mais ils ne sont pas encore suffisants pour statuer sur ce qui se passe réellement au champ. La méthodologie «classique» d'étude des caractéristiques rhéologiques et géotechniques (comme pour les autres aspects) s'avère donc peu adaptée pour les andosols, pour lesquels le remaniement et la deshydratation changent assez radicalement les propriétés «naturelles». Les andosols nécessitent des méthodes spécifiques de caractérisation.

« 6.5.14 L'érosion «agricole» des andosols

Problématiques

Les andosols non perhydratés des «hauts» de la Réunion sont exposés à l'érosion pour plusieurs raisons combinées, topographiques, climatiques, pédologiques, agro-socio-économiques :

« – topographiques
Les 15 000 hectares de surface nette (ravines non comprises) d'andosols non pefiydratés, sont répartis ainsi :

« – 3 500 hectares (23 %) ont des pentes générales comprises entre 10 et 20%,
« – 10 000 hectares (67 %) ont des pentes générales comprises entre 20 et 30%,
« – 1 500 hectares (10 %) ont des pentes générales comprises entre 30 et 40%.

D'autre part, les versants bosselés (avec «reins») sont très irréguliers : sur de courtes distances, les 3 classes de pentes précédentes peuvent coexister avec des directions différentes.

« – climatiques
Les risques cycloniques, avec pluies de très grandes intensités («avalasses»), pouvant atteindre 120 mnV-heure pendant 30 minutes (tab. 3.2), sont importants. Les pluies d'orages, de début et fin de saison des pluies, sont également dangereuses, d'autant plus que ce sont des périodes «critiques» de mise en place de campagnes agricoles.

« – pédologiques
Les andosols, lorsqu'ils sont perturbés (découverts, déssechés, travaillés) peuvent perdre leurs propriétés originelles favorables (grande perméabilité, bonne stabilité structurale). Une fois destructurés et desséchés irréversible ment, leur faible densité apparente et leur hydrophobie acquise les prédisposent à un entraînement rapide par «décollement» de leur horizon de surface et flottation des micro-agrégats hydrophobes (voir plus loin).

« – agro-socio-économiques
La majeure partie du domaine cultivé des «hauts» de la Réunion intéresse les andosols non perhydratés, spécialement l'ouest. Les cultures, à base de géranium, de cultures vivrières et maraîchères (pour ces dernières durant 2 cycles annuels) n'assurent pas une bonne protection du sol. Les plantes sarclées surtout géranium et pomme de terre, sont particulièrement dangereuses. D'autre part, le métayage ou «colonat partiaire» (mode de faire-valoir encore le plus général) et la petite taille des exploitations (75 ont moins de 2 hectares) sont peu motivants et peu favorables à une prise de conscience de l'urgence des pratiques antiérosives. L'élevage, qui, au sein des systèmes de culture, permettrait d'intégrer certaines mesures de cet ordre, est quasi inexistant en dessous de 1 300 mètres d'altitude. Enfin, assistance sociale, subventions et pluri-activité n'incitent pas le «colon», qui souvent ne pratique qu'une agriculture d'appoint, à considérer la terre comme un patrimoine à protéger.

La perception et la prévention de l'érosion sont donc difficiles à la Réunion. Elles se posent en termes différents suivants le milieu physique (sols, pentes, climats), les systèmes de culture en vigueur ou, envisagés, la taille du territoire considéré (région, bassin versant, exploitation, parcelle), les «intervenants» concernés (administration, associations, «développeurs», encadreurs, chercheurs, agriculteurs).

Une difficulté est de croiser ces approches de façon interdisciplinaire, afin de faire les bons diagnostics, de moduler et optimiser les propositions. Une autre difficulté est, à partir de constatations et d'analyses locales et

actuelles, d'extrapoler à des échelles spatio-temporelles élargies. En la matière, il n'y a pas de recettes toutes faites, il faut se garder des jugements définitifs et toujours se baser sur les spécifités et contraintes locales (humaines et physiques).

Rappels généraux

Lorsqu'elle se produit, lors d'une grosse averse, pour un sol dans un état donné, l'érosion hydrique se traduit globalement par une perte de terre, qui est le résultat de deux processus, agissant sur la préparation puis l'évacuation du matériau, qui s'enchaînent ou s'imbriquent :

« – l'action directe de l'énergie cinétique verticale de la pluie qui délie, éclate et disperse les agrégats (effet «splash») en ses particules constitutives ainsi prêtes au départ. Ce sont ici les facteurs «taille des gouttes», «intensité et durée» de l'averse, «couverture du sol» (végétation, mulch...) qui sont alors déterminants.
« – l'action entraînante de l'énergie cinétique latérale des eaux d'écoulement (non infiltrées) résultant de la dissipation d'une partie de l'énergie précédente, relayée et renforcée par la gravité. Interviennent ici, en plus des facteurs précédents, les facteurs «pente» (gradient et longueur) et «rugosité» de surface.
Ces écoulements latéraux peuvent théoriquement être décomposés en
« – ruissellements superficiels proprement dits, très rapides pouvant être dus à 3 causes possibles diminuant la vitesse d'infiltration

  « – la battance,
  « – la saturation du sol en eau,
  « – l'hydrophobie superficielle,

« – écoulements hypodermiques, moins rapides (dits aussi «ruissellements retardés»), dans la macroporosité de l'horizon de surface (0-25 cm). Ils sont dus à l'infiltration insuffisante en profondeur, elle-même la conséquence, soit d'une perméabilité inférieure, soit de la présence d'une discontinuité ou rupture de capillarité.
L'action mécanique latérale des eaux («compétence») sur le sol peut s'exercer à ces 2 niveaux, avec des modalités différentes :

  « – en surface : incisions (rigoles, ravineaux, ravins...) ou décapage en nappe. C'est l'érosion la plus manifeste.
  « – dans la couche de surface : reptation pelliculaire, fluage (limite de liquidité dépassée), et, dans le cas particulier des andosols réunionnais, «décollement - flottation».

Caractères des horizons de surface

Rappelons les spécificités des andosols qui, en synergie, auront un rôle sur leur mode particulier d'érodibilité:

« – très faible densité apparente,
« – dessiccation irréversible au delà de pF 4,
« – matière organique très fortement liée aux amorphes au sein des microagrégats et nano-agrégats,
« – bonne stabilité structurale à l'état naturel,
« – très forte perméabilité à condition de ne pas rompre artificiellement les capillarités ou de ne pas «écraser» les porosités «efficaces» (plus de 10 Pm),
« – structure continue en «B» mais micro-agrégation et micro-porosité emboîtées,
« – très faible pénétration racinaire dans le «B».

A l'heure actuelle, les andosols cultivés se présentent, dans leur partie supérieure, sous 2 modalités :

« – avec un horizon «A» maintenu (de plus de 20 cm d'épaisseur),

« – sans horizon «A».

Dans le premier cas, les pratiques culturales antérieures de géranium ont été suffisamment conservatrices (longues rotations avec Acacia decurrens ou canne à sucre) pour ne pas «dégrader» le sol. Dans le second cas (le plus souvent sur pentes fortes), le travail du sol, la faible densité de plantation et le sarclage répété du géranium ont abouti à un décapage total du «A» originel, obligeant à exploiter directement le sommet de l'horizon «B» à faible fertilité. Dans ce cas, les cultures sont souvent 'transparentes» et laissent voir des plages de sol nu érodé (photo A.37). A l'heure actuelle, cette deuxième situation se développe de plus en plus depuis la réforme foncière qui a vu l'abandon de la «jachère» à Acacia, obligeant à la sédentarisation de la culture du géranium sur des exploitations de faibles superficies. La promotion de l'intensification et de la diversification des productions au profit de 2 cultures vivrières ou maraîchères annuelles accentue la pression sur le sol et donc les dégâts de l'érosion.

– Les horizons «A» des andosols cultivés («Ap») ont les caractéristiques suivantes
  Sur 20 à 30 centimètres d'épaisseur, la teinte est brun sombre (7,5 YR 3/4 à l'état humide) ; la texture est limoneuse au toucher ; la macro-structure est grumeleuse fine, à agrégats peu cohérents de 1 à 2 cm de large, crées par l'enracinement dense. Ces agrégats sont constitués d'éléments plus stables de moins de 5 mm. Les racines fines exploitent uniformément le matériau. On trouve souvent des vers de terre.
  Le taux de matière organique est de 10 à 17 % ; le rapport C/N est de l'ordre de 12. Le rapport AF/AH est compris entre 1,4 et 2. Il existe une zone de transition de 5 à 10 cm entre le Ap et le B sous-jacent. En dessous, le taux de matière organique reste important (5 à 10 %) et le rapport AF/AH augmente régulièrement de 2 à 5.
– Les sommets d'horizons B cultivés («Bp»), après l'érosion du «Ap» initial se présentent ainsi
  Sur une épaisseur de 7 à 20 cm, la couleur est brune (7,5 YR 3/3) ; dans la partie supérieure (5 cm), la structure est particulaire à poudreuse ; en dessous, elle est continue et fragile, il n'y a pas d'agrégats naturels ; la cassure est anguleuse sans orientation ; par pression, on pulvérise aisément les morceaux. Les racines fines peuvent être abondantes, mais réparties de façon irrégulière, en fonction du travail du sol traditionnel (trouaison, sillonnage, apport de matière organique...). Il n'y a pas d'activité de vers de terre. Le taux de matière organique varie entre 7 et 12 %. Le rapport C/N est de 12 à 15. Le rapport acides fulviques sur acides humiques est compris entre 2,5 et 3. La limite avec la partie non travaillée sousjacente (continue, plus cohérente, brun-jaunâtre (10 YR 4/6)) est très nette. Il n'y a pas de transition. Pourtant cela ne correspond pas à une chute brutale du taux de matière organique qui, à 50 cm est encore de 5 à 7 %.
  Les sommets d'horizons «B» complètement décapés
  Ils ne comportent pas de végétation et sont desséchés de façon irréversible; ils montrent une croûte brune superficielle dure et craquelée en éléments de quelques centimètres, délimités par des fentes de retrait. En dessous, le matériau, brun-jaunâtre, reste frais et massif. L'érosion ravinante peut ici s'initier facilement et remonter sur les zones cultivées amont.

Les processus de l'érosion

a) Stabilité et évolution de l'agrégation élémentaire, rôle de la matière organique

CLARIOND et PY (1.989) ont comparé les caractéristiques des agrégats des divers types d'horizons d'andosols de Trois-Bassins :

– horizon de surface sous vieille friche à Acacia (A), cas le plus favorable, de moins en moins représenté,
– horizon de surface cultivé non érodé (Ap),
– horizon de surface cultivé érodé (Bp),
– horizon profond (B).

Selon un protocole initié par BROUWERS et FORTIER (1.985), les échantillons frais ont été préalablement tamisés à 5 mm. Puis, après saturation à l'eau, les sols sont doucement lavés et tamisés sous l'eau dans une série de 5 tamis à mailles de: 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,2 mm, 0,05 mm.

Pour caractériser la stabilité des agrégats, 2 traitements sont alors comparés :

- lavage à l'eau sans passage aux ultra-sons,
- lavage à l'eau avec passage aux ultra-sons (2 minutes, puissance 56 W).

Les résultats pour chaque classe d'agrégats («refus» dans chaque tamis) sont exprimés en % de poids sec (séchage à 105 ° C pendant 3 jours). La fraction inférieure à 0,05 mm est calculée par différence.

Les résultats sont représentés sous forme d'histogrammes ou de refus cumulés en fonction du diamètre des mailles de tamis.

A partir de chaque répartition, 2 indices comparatifs pratiques peuvent être utilisés : le «mean weight diameter» (MWD) et «l'indice d'émiettement» (IE) :

$$MWD(mm) = \frac{\Sigma refus(\%) x \text{diamètre de la maille du tamis (mm)}}{100}$$

$$IE = \frac{\text{Surface engendrée par la courbe cumulative}}{\text{Surface totale du diagramme}}$$

$$IE = \frac{S1}{S1 + S2}$$

S1 + S2 L'indice d'émiettement (IE) est compris entre 0 et 1 ; le MWD varie entre 0 et le diamètre de la maille du tamis le plus large (ici 2 mm). MWD et IE varient en sens inverse : plus le «diamètre moyen» est grand, moins le sol est «émietté».

On peut ensuite définir un indice de stabilité S, de la façon suivante :

$$S = \frac{MWD(\text{ultra-sons + lavage})}{MWD(lavage)}$$

S est compris entre 0 et 1 . C'est une notion relative qui a une valeur comparative ; elle dépend en effet de l'intensité d'émission de la sonde à ultra-sons.

TAB. 6.4 – *Caractères de la matière organique et valeurs des indices MWD, IE, S pour les principaux horizons des andasoLs cultivés sur cendres du Piton des Neiges*
(Trois-Bassins). (D'après Py et Clariond 1.989)

				MWD		IE		
	MO%	C/N	AF/AH	sans ultra-sons	avec ultra-sons	sans ultra-sons	avec ultra-sons	S
Horizon A	13	15	1,6	1,73	1,58	0,13	0,12	0,91
Horizon Ap	15	11	1,6	1,36	1,29	0,32	0,35	0,95
Horizon Bp	14	12	2,5	1 25	0,57	0,37	0,71	0,46
Horizon B	6	17	3,5	1,27	0,27	0,36	0,86	0,21

Le tableau 6.4 donne les principales caractéristiques des 4 horizons représentatifs testés par PY et CLARIOND.

De ces résultats, on conclut que (Fig. 6.32) :

- sous friche ancienne à Acacia (plus de 7 ans), l'agrégation est bonne (MWD élevé) ainsi que la stabilité des agrégats élémentaires (S élevé).

- sous culture, l'horizon Ap de sol non érodé possède une agrégation de «taille» inférieure, mais la stabilité des agrégats élémentaires est comparable.
- sous culture, l'horizon Bp de sol érodé possède une agrégation faible; la stabilité des petits agrégats est également faible (divisée par 2).
- enfin, l'horizon non travaillé B, a une faible agrégation et une faible stabilité structurale (S bas).

Un sol dont l'horizon «Ap» a déjà été érodé, sera de plus en plus érodible, au fur et à mesure que l'on cultive son horizon B profond. Il y a là un phénomène d'auto-catalyse. Par conséquent, un sol sera d'autant plus difficile à régénérer qu'il a été de nombreuses fois décapé, donc que son stock organique (tout en restant élevé) sera plus riche en acides fuiviques par rapport aux acides humiques, et que cette matière organique sera moins «évoluée» (C/N élevé).

Une mise en culture suffisamment longue et préservée de l'érosion, a pour effet d'abaisser le rapport C/N ainsi que le rapport AF/AH (comparaison des horizons B et Bp du tableau 6.4).

CLARIOND et PY ont constaté, en allant plus dans le détail, que, pour l'horizon Ap des sols non érodés, ce sont les classes supérieures d'agrégats (plus de 2 mm) qui présentent les rapports «AF/AH» et C/N les plus faibles, donc la matière organique la mieux humifiée («évoluée») et la plus stabilisatrice.

A l'inverse, dans l'horizon Bp des sols érodés, la matière organique évoluée se retrouve dans les agrégats de plus petite taille.

Si on compare le C/N des horizons Ap et A d'une part, Bp et B d'autre part, on constate que la mise en culture avec brassage, dessèchement plus ou moins prononcé et aération du sol en surface, a pour effet d'accélérer l'humification, ceci, évidemment si le processus n'est pas contrarié par un décapage plus rapide en cours de route. La mise en culture augmente ainsi la stabilité des agrégats élémentaires pris isolément, ce qui ne veut pas dire augmentation de la cohésion de ces agrégats entre eux (stabilité structurale de l'horizon), et donc de la résistance du matériau dans son ensemble à l'entraînement par l'érosion.

b) Le rôle de la dessiccation

La dessiccation du sol cultivé a un rôle important sur cette évolution de l'agrégation. Pour l'illustrer, BROUWERS et DUCREUX (1.989) ont mesuré et comparé, sur un horizon B d'andosol de Trois-Bassins, les variations du MWD (avec ou sans passage par les ultra-sons) et de la stabilité des agrégats en fonction du dessèchement du matériau. Le tableau 6.5 en donne une idée.

TAB. 6.5 – *Valeurs des indices MWD et S en fonction de la dessiccation*

WP%	MWD		S
	sans ultra-sons	avec ultra-sons	
0	1,30	0,99	0,76
5	1,03	0,35	0,83
1()	1,15	0,(X)	0,78
14	(),99	1,00	1,00
19	1,14	1,10	1,00
24	1,20	0,89	0,74
49	1,22	1,13	0,92
97	1,03	0,41	0,40
132	1,08	0,59	0,55
134	1,06	0,42	0,40

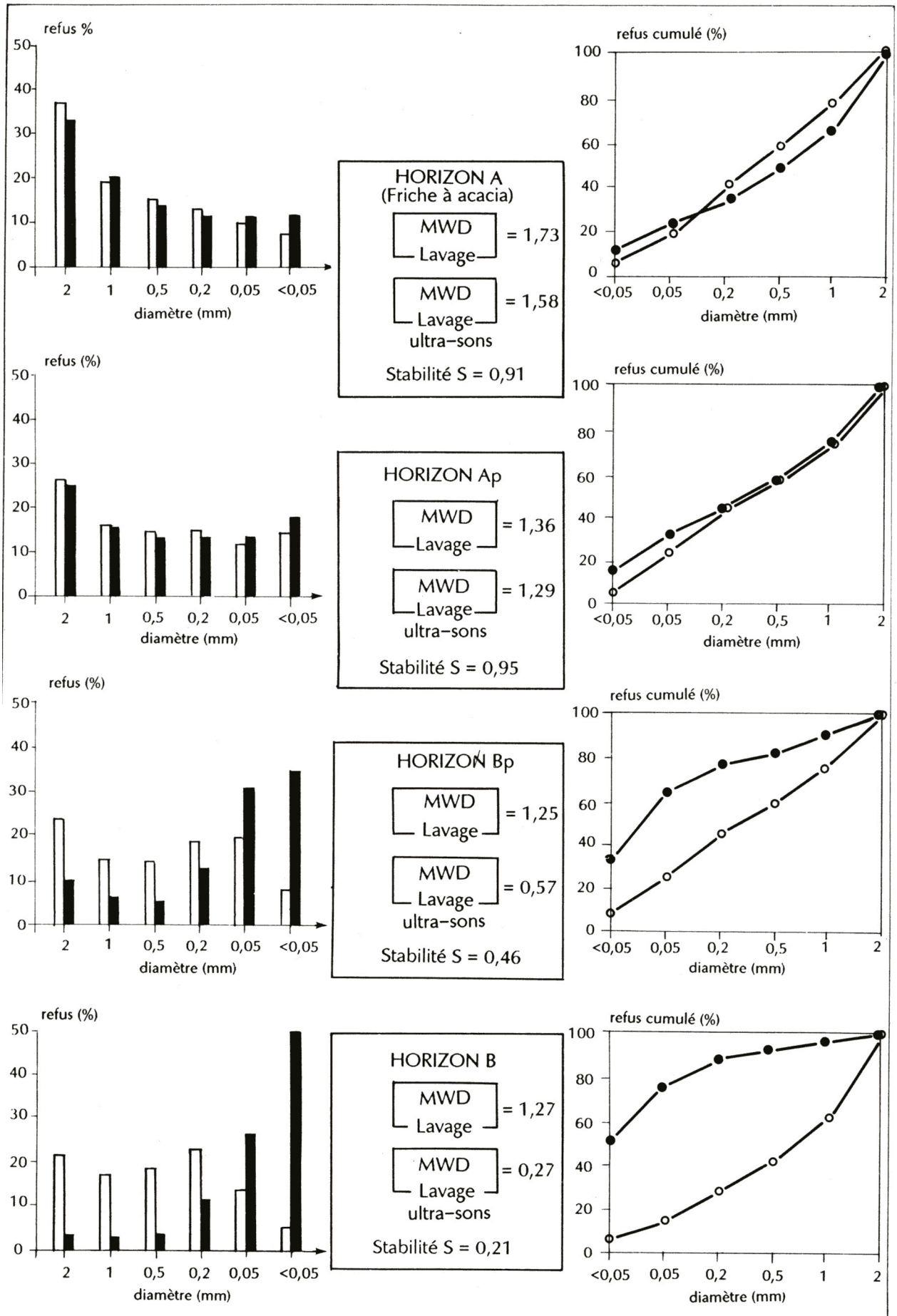
Pour les humidités pondérales «naturelles» les agrégats élémentaires du matériau andique présentent donc une stabilité faible à moyenne. Quand on le dessèche art'rficiellement, la stabilité (cohésion) des granules augmente brusquement et fortement à partir d'un seuil critique jusqu'à doubler.

Le seuil critique se situerait vers l'humidité à pF4 (entre 80 et 110 % d'humidité pondérale), correspondant,

comme nous l'avons vu (Fig. 6.25), à l'effondrement et au réarrangement, en partie irréversible, des microstructures.

A ce stade, le matériau ne peut se réhydrater que jusqu'à un certain point. Un séchage à l'air (pF 5,8) le rend très hydrophobe.

FIG. 6.32 – *Agrégation et stabilité des agrégats histogrammes et courbes du cumul des refus, en blanc : tamisage par lavage simple, en noir : tamisage par lavage après ultra-sons (d'après F. Py et A. Ckariond ; 1.989)*



Les horizons travaillés et cultivés des andosols peuvent subir pendant certaines périodes de l'année de tels dessèchements expliquant que leurs agrégats élémentaires soient beaucoup plus stables.

Il semble cependant qu'il y ait une certaine interaction «fractions organiques - humidité - cohérence des agrégats».

La sensibilité à la déshydratation irréversible dépend de la répartition des fractions organiques : plus le pourcentage de composants humifiés (AF +AH) dans la matière organique totale est élevée, donc plus le C/N est faible, plus le seuil d'humidité pondérale (Wp %) en dessous duquel il y a réorganisation irréversible, est bas ; donc moins l'horizon est sensible à cette évolution en conditions naturelles. D'autre part, ce seuil est d'autant plus bas que le rapport AF/AH est faible.

Dans les 4 horizons précédents, c'est l'horizon Ap (sol cultivé non érodé) qui a le seuil de déshydratation irréversible le plus bas. Les sols cultivés sur l'horizon B (Bp) sont les plus sensibles à ce processus. Cette irréversibilité est d'autant plus nette que le dessèchement se produit souvent (c'est-à-dire que le sol est travaillé et brassé énergiquement). Les sols sont donc d'autant plus sensibles à l'érosion qu'ils ont déjà été érodés récemment.

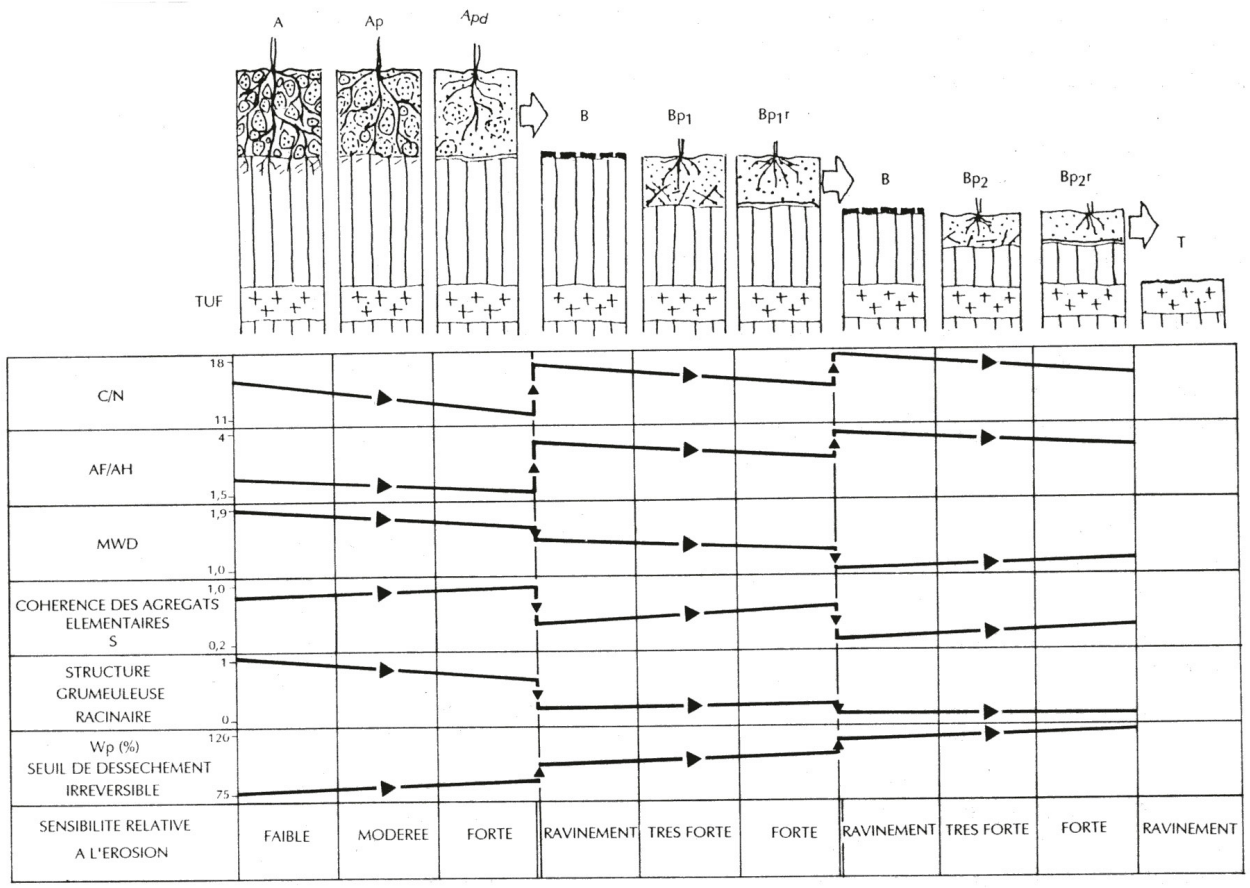
Or, on sait que les agrégats de réorganisation (pseudo-sables) sont très stables ; mais leur hydrophobie les empêche de s'agglomérer entre eux par des liens hydriques. Ils sont très facilement mobilisables en suspension/flottation dans les nappes de ruissellement. Les sols sont donc d'autant plus sensibles à l'érosion qu'ils ont déjà été érodés récemment.

c) La structure construite

Un autre élément important dans la résistance de l'horizon de surface à l'érosion est le système racinaire et son activité biologique associée. Lorsque la rhizosphère est en place depuis suffisamment longtemps, elle crée une macro-structure «grumeleuse racinaire» constituée d'agrégats de 5 à 20 mm de large ; ces agrégats, peu cohérents, sont reliés et collés entre eux par l'intermédiaire des racines fines (probablement grâce à leurs exudations mucilagineuses riches en polysaccharides). Ces macro-agrégats sont eux-mêmes constitués des classes d'agrégats élémentaires, relativement plus stables, de moins de 5 mm de large, qui eux, sont indépendants du système racinaire.

La mise en culture et le travail répété du sol détruisent facilement cette structure construite autour de l'armature racinaire, libérant de plus en plus les agrégats élémentaires stables et hydrophobes. On tend ainsi vers une structure particulaire, où les petits agrégats, légers, deviennent indépendants les uns des autres et donc facilement entraînables par le ruissellement. D'autre part, l'horizon supérieur, lorsqu'il pleut, du fait de l'infiltration fortement réduite (rupture de capillarité entre les deux horizons), se gorge rapidement d'eau ; il a alors tendance à se décoller du substrat et à migrer en paquets vers l'aval (Fig. 6.33).

FIG. 6.33 – *Schéma de la succession chronologique des processus de dégradation et d'érosion des andosols désaturés non perhydratés*



(.jpg)

L'érosion sur andosol dégradé, combine donc 2 processus : «flottation suspension» pour les agrégats individuels et «décollement - migration» d'ensemble pour l'horizon travaillé de surface (photo A.38). Ce 2ème stade s'accélère sur les pentes fortes. L'érosion linéaire en griffes de ravinement peut ensuite affecter l'horizon B mis à jour suivant une logique de «feed back» positif (autocatalyse). Cette dynamique est d'autant plus rapide et intense que l'on «descend» dans l'horizon B. Lorsque le décapage fait affleurer le «tuf jaune» ou les «gratons» («rein»), la dégradation maxima est atteinte et aucune «régénération» n'est plus possible (Fig. 6.33).

Lutte contre l'érosion et maintien de la fertilité

1. Contexte

   Le choix des systèmes et techniques de cultures doit se raisonner en termes de lutte contre l'érosion et conservation de la fertilité autant qu'en termes de temps de travaux, superficies disponibles et productivité.

   La région la plus menacée à court terme par l'érosion sur andosols est l'ouest de l'île (entre 1 000 et 1 300 mètres d'altitude), où le géranium, plante sarclée peu couvrante donc érosive, est considéré, encore aujourd'hui - socio-économiquement - comme la culture «pivot» et encouragée. Le géranium, introduit à la Réunion en 1 860 (vers 1.920 dans l'ouest) était autrefois une culture itinérante qui, après 4 à 7 années, alternait avec une longue jachère arborée à Acacia decurrens (7 à 10 ans), ou une culture de canne à sucre (entre 600 et 1 000 mètres d'altitude).

   De telles pratiques permettaient une certaine «régénération» du sol. Les travaux, y compris les défrichements de bois d'Acacia, étaient manuels.

   Cependant depuis une quinzaine d'années, la culture du géranium se sédentarise en monoculture sur de petites superficies (moins de 2 hectares en général, le plus souvent à pentes fortes) ce qui entraîne une dégradation des sols très inquiétante. Face à la chute de production, en 1.984 un «plan de relance» de la production de géranium incite à l'intensification et la diversification des cultures dans les Hauts de l'Ouest, par l'intermédiaire d'aides financières, d'encadrements, de remodelage foncier et de travaux de recherche.

   Pourtant, pour diverses raisons (humaines, structurelles, financières...), en 1.989, dans l'ouest, une grande partie des exploitants pratiquaient encore la monoculture de géranium sur la même surface sans précautions particulières. D'autre part, parallèlement, la production baisse très régulièrement. La situation s'aggrave donc.

   Les faibles superficies des exploitations (moins de 3 ha) et le «colonat partiaire» (forme de métayage) poussent à l'excès la productivité à l'hectare à court terme, aux dépens et dans l'indifférence du patrimoine foncier et du maintien de la fertilité. Le géranium (boutures plantées «au trou») est cultivé pendant 5 ans avec une densité couvrante de plus en plus faible au fur et à mesure de l'épuisement du sol (photo **??**.

   Des cultures vivrières et maraîchères, pratiquées pour l'autoconsommation, sont irrégulièrement associées au géranium ; soit en touffes disséminées dans le champ, soit autour de l'alambic, pour bénéficier du compost (résidus de distillation), soit en intercalaires (au trou) des rangs de géranium et alors seules bénéficiaires des composts. Les légumes sont récoltés au fur et à mesure des besoins. Deux cycles annuels peuvent être pratiqués.

   Le pari actuel, qui est de miser sur l'intensification de la filière géranium et la diversification pour faire vivre des gens (souvent pluriactifs) dans les «hauts» et éviter l'exode rural exige donc une politique anti-érosive très sévère. Faute de quoi, on risque de dilapider le potentiel en provoquant une dégradation très rapide du milieu. L'érosion, ayant la propriété de s'amplifier par auto-catalyse, sera alors de plus en plus difficile et coûteuse à contrôler.

   A terme, il y a le spectre du décapage généralisé de ces grands versants, accéléré par l'action catastrophique des pluies cycloniques. Ces dernières, ne pouvant plus être absorbées par le manteau cendreux, seront alors canalisées dans les multiples ravines et dévaleront en de gigantesques chasses d'eau, avec ce que cela laisse supposer comme dégâts sur les zones littorales et le lagon.

   Si on ne veut pas en arriver là, la culture productive et soutenue du géranium et des cultures légumières de rente implique et impose un certain nombre de conditions.

2. Prise en compte des pentes

   Tous les versants sont coupés de ressauts et replats dus à la topographie bosselée d'écoulement des

laves sous-jacentes au manteau cendreux. Une pente moyenne de 20 % sur un grand versant peut en fait contenir de nombreux fronts et bordures de coulées à pentes supérieures à 30 % et des replats à moins de 10 %. Au niveau de l'exploitation agricole (1,5 à 5 ha) toutes les classes de pentes peuvent exister, ce qui n'encourage pas l'agriculteur (surtout s'il est «colon») à les prendre en compte. Un autre handicap est la disposition des exploitations en lanières étroites (photo A.26) dans le sens de la pente, vieil héritage des concessions de la Compagnie des Indes («du battant des lames au sommet des montagnes»). Une telle disposition incite naturellement à travailler et cultiver le sol dans le sens de la pente et non en travers.

Il nous semble pourtant que la zonation topographique (même approximative) de chaque exploitation devrait être un préalable indispensable à toute politique anti-érosive. Il faut différencier les 3 classes de pentes suivantes :

- moins de 20 %,
- 20 à 30 %,
- plus de 30 %.

Par la même occasion, il faut identifier et localiser les axes d'écoulements naturels des eaux (gouttières, minitalwegs).

- Les pentes supérieures à 30 Ces pentes fortes ne devraient pas être cultivées, ni même pâturées. Elles doivent être couvertes de forêts, bois ou taillis. Les reboisements de production ou d'espèces fourragères (Leucaena) pourraient être des moyens de valorisation.
- Les pentes comprises entre 20 et 30 Ces pentes ne devraient être cultivées ni en géranium (en tout cas, pas en culture pure, ou sans plantes de couverture et travail minimum du sol) ni en plantes sarclées annuelles (pomme de terre en particulier) ni en cultures maraîchères dont les semis exigent un affinage soigné du sol. Leur véritable vocation est la prairie rustique (kikuyu), l'arboriculture (pêcher, légumineuses fourragères arbustives) ou la canne à sucre non mécanisée (en dessous de 1 000 mètres d'altitude). Ces zones ont déjà, pour la plupart, été décapées par la monoculture du géranium et auraient besoin d'être «régénérées». La mécanisation étant difficile, les prairies pâturées à installation peu perturbante, découvrant peu le sol, sont préconisées. C'est le kikuyu (Pennisetum clandestinum) qui, par sa rusticité et sa forte croissance en saison chaude, paraît le mieux adapté ; il ne demande (après un défrichement manuel si besoin est) qu'un sillonnage léger ; le bouturage est manuel, les amendements et fertilisants peuvent être apportés en couverture. Sur ces pentes fortes, les graminées tempérées et les légumineuses, demandant des soins et travaux plus nombreux (semis nécessaires), donc exposant dangereusement le sol à l'érosion, sont à éviter.
- Sur andosols non perhydratés, les zones dont les pentes sont comprises entre 20 et 30 % sont majoritaires en superficie (environ 60 %).
- Les pentes inférieures à 20 la majorité (environ les 4/5) est composée de pentes comprises entre 10 et 20 %. Leur domaine intéresse en superficie 25 à 30 % de la superficie totale des andosols non perhydratés. Elles sont dominantes :

  - à Dos d'Ane,
  - entre Bellemène et Trois-Bassins (en dessous de 900 mètres d'altitude),
  - en aval de Piton Hyacinthe,
  - entre le Tampon et la Plaine des Grègues (en dessous de 800 mètres d'altitude).

  Dans cette classe de pentes, le géranium et les cultures annuelles (vivrières et maraîchères, tabac) sont possibles moyennant un certain nombre des 84 précautions pour maintenir ou restaurer la fertilité : choix adéquat de systèmes de cultures (espèces cultivées, intercalaires, rotations), nature et époque du travail du sol, amendements organiques, cordons végétalisés...

3. Le travail du sol

   Trois principes essentiels devront être respectés :

   - exposer le moins possible le sol nu à l'action érosive des pluies, spécialement aux époques orageuses de fin de saison des pluies (récoltes de la 2è campagne et mises en place de la 1 ère campagne) et de début (mises en place de la 2è campagne).

- brasser le sol le moins possible afin d'éviter de détruire complètement la macrostructure «construite» et l'évolution vers une structure particulaire qui prépare l'entrainement des micro-agrégats par flottation.
- éviter de créer une discontinuité sous l'horizon travaillé, qui a pour effets néfastes interdépendants de :
  - provoquer une rupture totale de capillarité, avec pour conséquences, d'une part une chute de la perméabilité (donc engorgement rapide de surface quand il pleut) et d'autre part une grande sensibilité au dessèchement,
  - renforcer la localisation de l'enracinement, exclusivement en surface,
  - préparer le décollement de cet horizon et son entraînement latéral par les eaux d'engorgement hypodermique.

En conséquence, les travaux du sol (labours, sarclages, buttages, récoltes de tubercules...) devraient être réduits au minimum indispensable, et effectués aux bonnes périodes. La nature des outils, la fréquence de travail et les époques de l'année devront être optimisées, pour être compatibles à la fois avec la protection du sol et les systèmes de cultures envisagés.
Dans la mesure du possible il faudrait s'inspirer des principes suivants :

- effectuer tous les travaux perpendiculairement à la pente,
- préférer les outils à dents aux outils à disque (prohiber pulvériseurs et offsets).
- éviter les outils rotatifs (rotavator par exemple) qui pulvérisent dangereusement,
- lorsque le labour est indispensable, le faire en avril (début de saison sèche) et l'associer ensuite à un mulch (couverture morte) pour éviter le dessèchement excessif,
- ne pas labourer la même parcelle plus de 1 fois tous les 2 ans et uniquement pour les opérations indispensables telles les enfouissements de fumure de fond ou d'amendement calcaire,
- en contre partie, il faudra développer les techniques de semis direct sans travail du sol (sillonnage, puis semis) associées à l'installation de plantes de couvertures ou de «couvertures mortes» (mulching), ainsi qu'au contrôle chimique sélectif de l'enherbement (recherches en cours au CIRAD (A.3)),
- préférer le matériel léger avec petite mécanisation («motoculteur»), au matériel lourd, peu adapté aux pentes et à la disposition des parcelles.

4. Les apports de matière organique
   L'état de la matière organique et l'activité biologique sont les pivots de la protection et de l'amélioration de la fertilité des andosols. Il faut tendre vers une matière organique «active» relativement à des processus microbiens équilibrés de minéralisation et d'humification (turn-over), renforcés par la présence d'une méso-micro-faune (vers de terre). Les processus biochimiques du métabolisme microbien et mécaniques des vers de terre augmentent la macro-agrégation et la stabilité structurale. Indirectement ils retardent le dessèchement superficiel du sol et donc sa micro-nodulation défavorable.
   Les travaux de PY et CLARIOND (1.989) ont montré (essais en pots) qu'il existe une microflore potentiellement «opératoire» dans ces andosols puisque dans tous les cas un apport de glucose induit un départ ou une augmentation de l'activité respiratoire. L'intensité et la durée de cette activité dépendent de l'équilibre des supports énergétiques (carbone) et structuraux (azote) présents dans le milieu, de leur accessibilité et de leur biodégradabilité. On sait qu'une grande partie de la matière organique, très fortement liée à la matière minérale, est inutilisable. Il semble que seuls les apports actuels de matière organique fraîche servent de support à la microflore existante. Ainsi sous friche à Acacia decurrens, le sol régulièrement alimenté en matière organique facilement minéralisable (feuilles et racines) «respire» 2 fois plus (2 ppm C02/h) que sous culture (1 ppm) où la chaîne d'approvisionnement continu est rompue.
   Le substrat carboné énergétique est d'autant mieux utilisé que le carbone est «peu évolué» donc à C/N élevé (glucose > pailles > écumes de sucreries > compost > fumier) et qu'il existe par ailleurs une source d'azote disponible. Il y a donc nécessité d'une libération continue de carbone et d'azote pour que le stock bactérien existant s'active et se multiplie. Mais en sols non érodés (horizon A conservé) une

partie importante des apports, carbonés et azotés, paraissent immobilisés dans le système organo-minéral stable du sol.

Les interactions «racines/fractions organiques /turn-over/matière minérale/microflore (espèces, abondance, habitat, activité)» paraissent complexes et difficiles à étudier dans le cas des andosols. Concernant les andosols de la Réunion, on n'en connaît pratiquement rien. C'est certainement dans ce domaine qu'une recherche de base pourrait avoir le plus d'implications agronomiques.

L'absence de restitutions organiques dans les sols cultivés en continu en géranium explique en grande partie la dégradation de leur fertilité et leur décapage de plus en plus préoccupant. Tous les essais ont montré que les apports de matière organique (compost, fumier) ont des effets très positifs.

La matière organique apportée servirait de substrat nutritionnel et énergétique à la microflore présente, agissant alors comme «starter» vis à vis du déblocage partiel par cette microflore de la matière organique ancienne et peu biodégradable du sol. Cet effet serait plus ou moins prononcé et durable suivant le type de matière organique apporté (résidus de récolte, engrais vert, compost, fumier, mulch, jachères ou prairies de «régénération»), sa profondeur, son rapport C/N. Ce sont les effets cumulés et combinés d'incorporations entretenues et régulières qui, peu à peu, donneront des résultats sur la stabilité structurale de macro-agrégation.

A l'heure actuelle, les agriculteurs dont les exploitations sont situées entre la zone «canne à sucre» et la zone «élevage», c'est-à-dire entre 900 et 1 300 mètres d'altitude dans l'ouest et 600 et 1 200 mètres dans le sud, sont les plus démunis en sources de matière organique. En effet les faibles superficies des exploitations, le manque de main d'oeuvre (surtout dans l'ouest), l'étroite marge de manoeuvre des «colons» vis à vis des propriétaires, freinent l'intégration de l'élevage. Pourtant, seul l'élevage intégré à l'exploitation (étable ou pâturage), permettrait une gestion saine et efficace de la fertilité des sols cultivés sur pentes : production autonome et suffisante de fumier, soles de régénération en graminées et/ou légumineuses fourragères, valorisation des haies et cordons anti-érosifs végétalisés (Leucaena, Bana grass, Guatemala grass...)

Les producteurs de géranium ne disposent que de «compost» issu de la décomposition des résidus de distillation. Ce compost est souvent gaspillé ou utilisé ponctuellement pour les plantes exigeantes (légumes) cultivées autour de l'alambic. De toute façon, cette source est insuffisante pour satisfaire les besoins réels. Il en est de même du fumier produit par les animaux de ferme (poules, porcs..). Le «boeuf-fumier» est rare. Les maraîchers de la région sud (du Tampon à la Plaine des Grègues), plus riches, sont dans l'obligation d'apporter du fumier ou des écumes qu'ils ont la possibilité d'acheter quand ils n'ont pas de petit élevage.

Mais, dans la «zone géranium» (ouest), la plus critique, la faiblesse des revenus ne permet pas à l'agriculteur d'acheter fumier, compost ou bagasse. Il fait l'impasse sur les amendements organiques. En tant que colon, la motivation de la conservation du sol avec vision à long terme, est faible. Le propriétaire foncier, non agriculteur, n'est, lui non plus, pas prêt à financer ce type d'intrant.

Les exploitations à base de géranium devraient introduire la production de fumier dans leur système, par un petit élevage de 1 à 3 «boeufs-fumier» à l'étable. Il est impératif, en plus, que le compost de géranium (bien évolué) soit restitué en totalité et de façon équilibrée (pas uniquement sur les légumes). De plus, les parcelles cultivées (à moins de 20 % de pentes) devraient, tous les 5 ans, être mises en prairies mixtes (graminées/légumineuses) pendant au moins 4 ans pour la régénération structurale sous l'effet, d'une part d'un enracinement à la fois fasciculé dense (graminées) et profond (légumineuses), d'autre part d'une activité biologique réactivée (microflore et vers de terre). Cette sole fourragère serait fauchée ou pâturée avant d'être remise en culture.

Reste à savoir si une telle solution est réaliste en termes de temps de travaux et de rentabilité (et même de survie 1). Les transports et épandages de fumier demandent du temps et du matériel.

5. Les aménagements dans l'exploitation

Nous avons déjà parlé des classes de pentes. Chaque exploitation devrait avoir sa carte des pentes avec les emplacements des talwegs et chemins d'eau. Les ressauts escarpés de plus de 30 % où affleurent souvent les «reins» seront couverts de taillis ou boisements (productifs ou non). Les pentes 20-30 % pourraient être en prairies permanentes (kikuyu, canne fourragère...). Concernant les replats cultivés à pentes inférieures à 20 % (10-20 % le plus souvent), il faudra y réduire le ruissellement au profit de l'infiltration en «coupant» le versant, en jouant sur l'état de surface pour le rendre le plus absorbant

possible. Nous ne sommes pas favorables à la réalisation de terrasses et banquettes qui nécessitent des travaux importants et coûteux remaniant les sols donc très peu indiqués pour nos andosols. En plus, le morcellement et l'irrégularité du modelé s'y prêtent peu. Les méthodes «douces» d'adaptation au terrain sont à rechercher à la Réunion. Plusieurs moyens peuvent être envisagés, alternatifs ou combinés (Fig. 6.34)

- Les cordons isohypses végétalisés

Ce système est efficace s'il est bien fait et entretenu (photos A.31 et A.39). Il consiste à construire des bourrelets (hauts de moins de 50 cm et larges de 1 mètre), d'environ 3 mètres de dénivellation, c'est-à-dire écartés de 15 mètres si la pente est de 20 % et de 30 mètres si elle est de 10 %. Ces cordons peuvent avoir une légère pente (1 %) orientée vers les talwegs naturels pour qu'en cas d'averses de forte intensité, l'eau puisse s'évacuer par la gouttière amont vers un talweg naturel. Ils ne doivent jamais barrer un axe naturel d'écoulement d'eau. Le danger de ce système est en effet la brèche par où les eaux se concentrent et s'engouffrent avec création rapide de ravins, difficiles ensuite à enrayer. Il faut couvrir de végétation au plus vite toute la largeur du cordon afin de le renforcer et qu'il puisse mieux ralentir et absorber les eaux susceptibles de passer par dessus. En dessous de 1 200 mètres d'attitude, les grandes graminées fourragères pérennes du type Bana grass (Pennisetum purpureum x Pennisetum thyphoides), canne fourragère (Pennisetum purpureum) ou Guatemala grass (Tripsacum laxum) ont fait leurs preuves et peuvent compléter un affourragement à l'étable de boeuf-fumier. Le vetyver (Vetiveria zizanoides) est également très efficace.

Autres plantes utiles : le Leucaena leucocephala d'altitude (légumineuse arbustive fourragère), la patate douce, le goyavier. En attitude (plus de 1 200 mètres), il faut essayer des espèces tempérées (pêchers, frênes, ajoncs...)

- Les cultures en bandes alternantes isohypses

Le principe est d'alterner en parcelles étroites perpendiculaires à la pente les cultures érosives (géranium, plantes sarclées annuelles) avec les cultures plus couvrantes (fourrages, vergers enherbés, cultures associées en intercalaires...) ou à cycles un peu décalés, de façon à limiter les risques en début et fin de campagne. Ces bandes peuvent avoir 20 à 50 mètres de larges suivant la raideur de la pente. Elles peuvent faire l'objet de rotations. Evidemment à l'intérieur des bandes, travail du sol et semis (ou plantations) se feront suivant les courbes de niveau. Quand la superficie cultivable de l'exploitation le permet, une variante du principe précédent consiste à créer des «bandes absorbantes» de 5 à 10 mètres de large (espacées de 20 à 50 mètres), couvertes d'une prairie permanente à Pennisetum clandestinum (kikuyu).

- Enherbement des «sites sensibles»

Ce sont les abords de toutes les petites voies d'eau

Il s'agit d'abord des gouttières et mini-talwegs naturels concentrant rapidement les eaux et à partir desquels peut s'initier une érosion ravinante régressive rapidement incontrôlable. Lorsque ces axes d'écoulement traversent une parcelle, il faudra les couvrir d'herbe (chiendent, kikuyu) sur une largeur suffisante. Les cordons végétalisés doivent s'interrompre à leur passage.

Devraient être traités de la même façon :

- sur environ 1 mètre, les gouttières amont des cordons isohypses, également lieux d'écoulement d'eau,
- chaque côté des voies de passage et d'accès (éviter de cultiver en bordure) et, si possible ces voies elles-mêmes.

- Couverture permanente du sol cultivé

Pour la plupart des plantes annuelles, il y a 2 cycles de cultures possibles

ter cycle : semis en mars/avril - récolte en juillét/août,

2è cycle : semis en septembre/octobre - récolte en janvier/février.

Le premier cycle (de saison sèche) vit sur les quelques pluies, la réserve en eau du sol, les précipitations «occultes» (rosées) et parfois les compléments d'irrigation (en cultures maraîchères) quand l'eau est disponible. Le travail du sol, dont un rôle important est l'enfouissement des mauvaises herbes et des résidus de récolte de la campagne précédente, se fait en fin de saison des pluies (mars), avec certains risques d'orages. Il a aussi l'inconvénient de favoriser le dessèchement superficiel du sol.

Le deuxième cycle (de saison des pluies) peut être dévasté, avant que la culture ne s'installe, par les pluies

violentes de novembre. Les pluies cycloniques sont également dangereuses pour les sols mal couverts par les cultures, quand celles-ci demandent trop de sarclages. Les récoltes de tubercules (pommes de terre) en saison des pluies (décembre à février) sont particulièrement dangereuses.

Quant au géranium, ses boutures se plantent au trou en saison sèche. Il reste en terre plusieurs années (4 à 7 ans) ; mais la couverture du sol s'éclaircit peu à peu en même temps que le sol se «fatigue» ; les manquants sont remplacés au fur et à mesure.

Dans les Hauts de l'Ouest, toutes ces cultures sont très érosives. Le géranium protège mal le sol de l'impact des pluies et du ruissellement quand il est conduit avec des sarclages fréquents. Les autres cultures demandent également pour la plupart, des sarclages et buttages (haricots, pommes de terre, maïs, tabac...) ou des préparations fines (parfois des planches) spécialement les cultures maraîchères à petites graines.

Il faut chercher à couvrir le sol au maximum en saison des pluies, à le travailler le moins souvent possible et sur la surface minima indispensable. Or, le problème essentiel est l'envahissement par les mauvaises herbes spécialement celles à multiplication végétative (Phalaris arundinacea, Oxalis sp., Cyperus rotondus...). Les méthodes de lutte classiques sont les labours et les sarclages/buttages, pratiques qu'il faudrait justement éviter, et qui mobilisent de façon importante la force de travail. En plus de découvrir le sol, les labours et sarclages détruisent la structure fragile et peuvent assécher la zone racinaire.

Pour résoudre ce problème difficile à la Réunion, la recherche agronomique (MICHELLON, CIRAD (A.3)) s'oriente actuellement vers la combinaison «plantes de couverture - semis direct sans travail du sol - herbicides sélectifs». Ces techniques donnent de bons résultats sur de vastes surfaces, aux Etats Unis et au Brésil (SEGUY et al. 1.989).

Ainsi l'association géranium-kikuyu permanent maîtrisé par le fluazifop-Pbutil se montre déjà intéressante

Le travail minimum peut consister en un simple sillonnage précédant le semis direct où la plantation de boutures.

L'idéal serait de trouver une gamme de plantes de couverture qui soient à la fois bien couvrantes, améliorantes pour le sol (structure, matière organique, faune, microflore), peu concurrentielles pour les plantes cultivées (éléments minéraux, eau, lumière, CO_2...) et sans allélopathie vis à vis d'elles, éliminatrices des «mauvaises» adventices (allélopathie bénéfique), faciles à maîtriser par des désherbants sélectifs.

Ainsi, à Trois-Bassins, plusieurs plantes de couverture sont actuellement testées :

- soit pérennes avec des graminées telles le kikuyu ou des légumineuses comme trèfles, lotiers...,
- soit s'intégrant dans les cultures annuelles (en cycle de saison des pluies): riz, avoine, Desmodium.

En saison sèche, les plantes de couverture vivaces présentent l'avantage paradoxal d'améliorer l'alimentation hydrique de la plante cultivée en favorisant le captage des rosées (source importante d'eau pendant cette période) et également par son effet de mulch.

Un autre procédé de protection du sol est le mulching (paillage). Il consiste à étaler les résidus de récoltes et de sarclage qui se décomposent lentement sur place. A la Réunion, on utilise quelquefois des épandages de bagasse.

La couverture morte, outre son effet d'atténuer efficacement l'impact des pluies et du ruissellement et de réduire la prolifération des adventices, peut favoriser le développement de l'activité biologique (vers de terre, microflore). Elle réduit aussi l'évaporation et tamponne le micro-climat de surface (température, humidité).

Enfin la couverture morte est compatible avec le semis direct sans travail du sol.

Naturellement, certains mulch peuvent se décomposer et se minéraliser trop vite, avant la fin de la saison des pluies (pour le 2è cycle) et ne jouent plus leur rôle. Il faut aussi se méfier des allelopathies possibles.

La recherche agronomique doit donc déterminer en matière de couverture permanente et de semis direct :

- les espèces les plus efficaces de couverture vivante, en matière d'allélopathie vis-à-vis des adventices, de non concurrence avec la plante cultivée spécifique, d'amélioration biophysique du sol,
- les herbicides sélectifs efficaces, utilisables pour les mélanges «couverture - plantes cultivées», leurs modes et périodes d'application, en fonction de la culture,

– les mulch les plus adéquats (lente décomposition, bonne couverture...).

Il nous semble que c'est parmi ces techniques que l'on trouvera la solution d'avenir la plus intéressante pour le contexte réunionnais. Non seulement elles peuvent résoudre en majeure partie les problèmes d'érosion et de fertilité des sols, mais aussi elles devraient permettre une réduction importante des temps de travaux.

Il faut remarquer cependant qu'une couverture dite «permanente» pourrait demander périodiquement (tous les 3 ans ?) un travail profond (soussolage) et un retournement du sol afin d'incorporer engrais et amendements (chaux, fumier) ainsi qu'un réensemencement des espèces de couverture, celles-ci pouvant exiger une inoculation de rhizobium (trèfle, luzerne, lotier...).

6. Régénération des sols érodés

Les secteurs où l'horizon Ap à structure grumeleuse a disparu nécessitent une «régénération» plus ou moins longue et coûteuse. Dans ce cas, un soussolage profond (ripper, gros chisel), suivi d'un labour avec enfouissement de doses importantes de fumier (50 t/ha), de fumure de fond et d'amendements calciques (carbonates ou silicates), nous semblent un préalable. Pour que le sol «se fasse», par les racines la microflore et la mésofaune, avec création d'un nouvel horizon A, il faut attendre au moins 4 ans sous jachère améliorante. Celle-ci peut être un mélange de légumineuses à pivots et de graminées à systèmes fasciculés. En dessous de 900 mètres d'altitude, on peut encore penser à des espèces tropicales : Stylosanthes, Desmodium, Pueraria, Vigna (niébé), Glycine (soja) pour les légumineuses, Brachiaria, Cenchrus, Pennisetum, Tripsacum (Guatemala grass), Setaria pour les graminées. Au-dessus de 900 mètres, les espèces tempérées sont parfois mieux adaptées : dactyle, fétuque, ray-grass, avoine pour les graminées, luzerne, trèfles, lotier pour les légumineuses.

Les légumineuses sont plus difficiles à implanter en raison de l'acidité du sol et de la faible activité biologique. De fortes doses d'amendement calcaire et de fumier peuvent alors être nécessaires, tout comme l'inoculation des graines.

Après plusieurs années de jachères, les prairies sont détruites aux herbicides ou gyrobroyées et enfouies par un labour avec réincorporation d'amendements. Les parcelles «régénérées» peuvent ensuite être aménagées avec cordons végétalisés en courbes de niveau. Les systèmes de cultures associées en intercalaires (photo A.32) avec rotations de cultures fourragères et/ou avec couverture permanente sans travail du sol devraient ensuite conserver la fertilité et la structure du sol.

6.5.15 Autres problèmes agronomiques

Les andosols non perhydratés sont à l'origine de quelques problèmes agronomiques, d'ordres hydrique, physique, organique et chimique, plus ou moins interdépendants, résultant de leurs propriétés particulières. A cela s'ajoutent naturellement les contraintes topographiques du milieu.

Le problème du phosphore

Nous avons vu que les andosols présentent des réserves assez élevées en phosphore : 1 500 à 3 000 ppm de phosphore total, 150 à 400 ppm de phosphore «OLSEN» (appelé traditionnellement «assimilable»). Cette forte proportion de phosphore est liée à la richesse de ces sols en matière organique, en produits amorphes aluminiques à forte capacité d'échange anionique et en fer amorphe ayant également une forte affinité pour cet élément.

Par ailleurs, et malgré que les andosols soient les sols les plus riches en phosphore de l'île, des essais en vases de végétation pendant 5 années (FRITZ, 1.973) ont toujours montré de très fortes «carences», plus encore que les sols ferrallitiques, pauvres en phosphores total et assimilable.

Enfin, au champ, la réponse à l'apport de phosphore sur andosol cultivé en canne à sucre (Colimaçons) est peu nette. Elle ne commence à se manifester qu'en deuxième repousse. Il n'y a pas d'action sur la richesse en sucre (DADANT, 1.974). D'autre part les teneurs en phosphore des cannes poussant sur andosols sont très faibles : 0,02 % de la matière sèche en troisième et quatrième repousse, sans différence entre les doses d'apport. Les exportations de P205 sont très réduites (moins de 150 grammes par tonne de canne soit moins de 10 kg par ha).

Or sur les sols bruns, quand les rendements sont élevés, ils sont corrélés à de fortes teneurs en phosphore dans la plante (plus de 0,1 % de la matière sèche) et donc à de fortes exportations (plus de 0,5 kg P205 par tonne de canne).

De ces constatations, on conclut que le phosphore est très fortement retenu dans les andosols et que cet élément apporté par fertilisation est rapidement rétrogradé. TRUONG, BERTRAND et PICHOT (1.974) ont montré (Fig. **??**) que ces sols avaient effectivement un très fort pouvoir fixateur pour le phosphore et par conséquent une très faible concentration dans la solution du sol. Le phosphore apporté est piégé au sein des constituants organo-minéraux et fortement retenu par l'aluminium et le fer (au pH du sol).

Dans ces conditions, pour que l'apport de fertilisation phosphatée soit efficace, il faut parallèlement favoriser la minéralisation de la matière organique, donc activer l'activité biologique (baisse du rapport C/N) par apport de matière organique à la fois fraîche et humifiée (fumier...). Il faut également relever le pH de façon à augmenter les charges négatives par rapport aux charges positives des colloïdes aluminiques. Le chaulage sera donc nécessaire. Une fois le pH remonté aux alentours de 5,5 (voir ci-dessous), l'assimilation du phosphore par la plante devrait moins poser de problèmes. En canne, une fumure d'entretien contenant 50 kg/ha de P205 paraît alors suffisante.

Remontée du pH : nécessité du chaulage

Nous avons vu que les andosols sont des sols fortement à moyennement acides dans l'ouest et le sud-ouest, le pH de surface est compris entre 5 et 5,3 dans le nord et l'est, il est compris entre 4,5 et 5,1 .

Le pH des andosols est toujours inférieur au point de charge nulle (ZPC) qui est de l'ordre de 5,3 à 5,5. Tant que le pH du sol reste inférieur au ZPC, il y a prédominance de charges positives sur le complexe adsorbant, contribuant à retenir les anions en particulier les ions phosphates. D'autre part, lorsque le pH du sol est inférieur à 5, la quantité d'aluminium échangeable augmente. Ainsi les andosols non perhydratés présentent entre 1 mé/100 g (ouest) et 3 mé/100 g (est) d'aluminium échangeable dans l'horizon de surface ce qui est élevé compte tenu de la faible CEC (6 à 8.mé/100 g). Il y a donc des risques de toxicité aluminique.

Il paraît donc nécessaire de remonter le pH aux alentours de 5,5.

Des essais en laboratoire (ALBERTELLI, 1.987) montrent que pour remonter le pH d'une demi unité, il est nécessaire d'apporter environ 4 tonnes de $CaCO_3$ à l'hectare qui a pour effet également d'augmenter la capacité d'échange et le calcium adsorbé, de 2 à 3 mé/100 g.

Dans la région au vent, les andosols plus acides devraient donc recevoir 4 à 7 tonnes/ha de carbonates. Dans la région sous le vent des doses 2 à 4 t/ha seraient nécessaires (photo A.35).

Ceci est évidemment théorique et à tester au champ. Tout comme la nature de l'amendement à apporter - carbonate ($CaCO_3$) ou silicate ($CaSIO_3$) - et sa forme (granulométrie).

On ne sait pas quelle est la durée d'action de l'amendement apporté. L'exploitant devrait faire régulièrement (1 fois par an, toujours à la même époque) des contrôles de pH de façon à estimer la fréquence d'apports d'amendements.

L'alimentation azotée : mauvaise nitrification

La nutrition azotée des cultures sur andosols est mal assurée sans forte fertilisation. En dehors de la minéralisation éventuelle des résidus de récolte, l'azote organique de l'humus stable est difficilement minéralisable et participe peu à l'alimentation. Pourtant les teneurs en azote total sont élevées (5 à 7 dans les 20 cm supérieurs). Pour la canne par exemple, alors que sur le littoral du nord à sols ferrallitiques, 100 unités d'azote suffisent en entretien, sur andosols, les besoins montent à 140/150 unités.

Le coefficient de minéralisation annuel de la matière organique des andosols (non décapés) est faible, de l'ordre de 0,6 % (I. CHECKOURI, 1.990), 2 fois inférieur à celui des sols ferrallitiques du littoral nord.

De plus, sur andosol non érodé, entre 30 et 60 % de l'azote de l'engrais azoté est stocké («réorganisé») rapide-

ment sous forme organique (PY et CLARIOND, 1.989). Le sol érodé (horizon A décapé) valorise mieux l'azote apporté mais cet azote est plus rapidement perdu par lessivage/ruissellement que sur sol non dégradé.

Les taux de minéralisation ou de réorganisation sont sous la dépendance de la microflore. Des mesures respirométriques (PY et CLARIOND, 1.989) ont montré qu'il existe une microflore en vie ralentie qui était activée par l'apport de substrats carbonés et azotés facilement métabolisables (composts, pailles, fumier...). Dans la matière organique humifiée des andosols, le carbone et l'azote, piégés au sein des microstructures, seraient donc peu accessibles à la microflore.

Les pratiques culturales devront donc chercher à réveiller ou créer une activité biologique accélératrice du turn-over et minéralisatrice d'azote. Ces pratiques ont déjà été évoquées lorsque nous avons parlé de «l'érosion agricole» ; elles vont en effet dans le même sens que la protection contre l'érosion, avec création d'une structure «biologique» en surface. Ce sont les systèmes de cultures «conservatifs» intégrant :

- travail minimum du sol,
- couverture «morte» ou vivante (contrôlée par des herbicides sélectifs) sous les cultures,
- introduction de prairies dans les assolements et rotations, avec espèces tropicales ou tempérées selon l'altitude. Si possible mélange de graminées et de légumineuses (préalablement à un chaulage),
- apport de matière organique : fumier, composts, bagasse, écumes de sucreries. Essais d'introduction de vers de terre et éventuellement de champignons.

Un tel système de cultures aura pour effet, avec le temps, de baisser le rapport «C/N» et le rapport «acides fulviques/acides humiques» de la matière organique. Peu à peu, l'andosol ainsi cultivé, créera sa propre ambiance écologique favorable à la fois à la minéralisation de l'azote et au déblocage du phosphore.

La mauvaise exploitation racinaire du sous-sol

Malgré leur aspect de «terre franche» (grande épaisseur, absence de cailloux, friabilité, texture limoneuse...), les andosols sont peu exploités par les systèmes racinaires en dessous de 20 cm de profondeur. Ceci est surtout valable pour les cultures annuelles sans enracinement pivotant (certaines cultures maraîchères, maïs...). Le tabac et les crucifères ont moins de problèmes. Mais même les arbres fruitiers maintiennent leurs racines dans la terre remaniée des trous de plantation.

L'horizon B semble donc un milieu relativement «hostile» aux enracinements. La raison essentielle nous semble être physique : l'horizon B a une structure «continue», c'est-à-dire que, contrairement aux sols «classiques», il ne présente pas de macro-agrégats naturels, donc pas de macro-porosité fissurale ni plans d'interface privilégiés susceptibles de faciliter la pénétration et la progression des racines en même temps que l'aération du sol. Malgré la forte porosité totale (70 à 85 %), la part de la macroporosité susceptible d'être élargie et exploitée par les racines fines, est insuffisante. Seules quelques grosses racines à fort pouvoir de pénétration peuvent passer. Une deuxième raison est la faible porosité à l'air du matériau due à la microporosité emboîtée remplie, en majeure partie et en permanence, d'eau. La perméabilité à l'air et l'aération y sont insuffisantes.

Enfin le travail fréquent du sol (y compris les sarclages), le dessèchement plus ou moins irréversible et la micro-granulation qu'il occasionne dans l'horizon de surface, tend à rompre tout lien physique et hydrique avec la profondeur, avec rupture de macroporosité donc impossibilité de progression mécanique des racines.

L'expérience montre que la sous-soleuse «classique» est peu efficace dans les andosols. Elle tranche dans l'horizon B comme dans du beurre sans aucun effet d'éclatement susceptible de créer une porosité fissurale.

Le CEEMAT (A.3) a testé un type de décompacteur qui paraît assez efficace : le «paraplow» (matériel HOWARD) ; c'est un outil à 2 ou 3 dents inclinées à 45 ° et à volet orientable, travaillant à 35/40 cm. Il a l'avantage de ne pas bouleverser le sol en surface et de bien le fissurer en profondeur. Il exige une puissance de traction assez importante (30 ch par dent). Un écartement des dents de 60 cm, l'adaptation de socs à ailettes et 2 passages croisés devraient améliorer sensiblement la situation. Ce traitement ne sera valable que si la pente, la régularité du terrain et la taille de la parcelle le permettent. Au-dessus de 20 % de pente, ce n'est plus envisageable. Le

décompactage, pour être valorisé et pérennisé, devrait être suivi d'une implantation fourragère à enracinement profond, qui resterait quelques années en «jachère d'amélioration». Le dactyle s'est montré capable de jouer ce rôle.

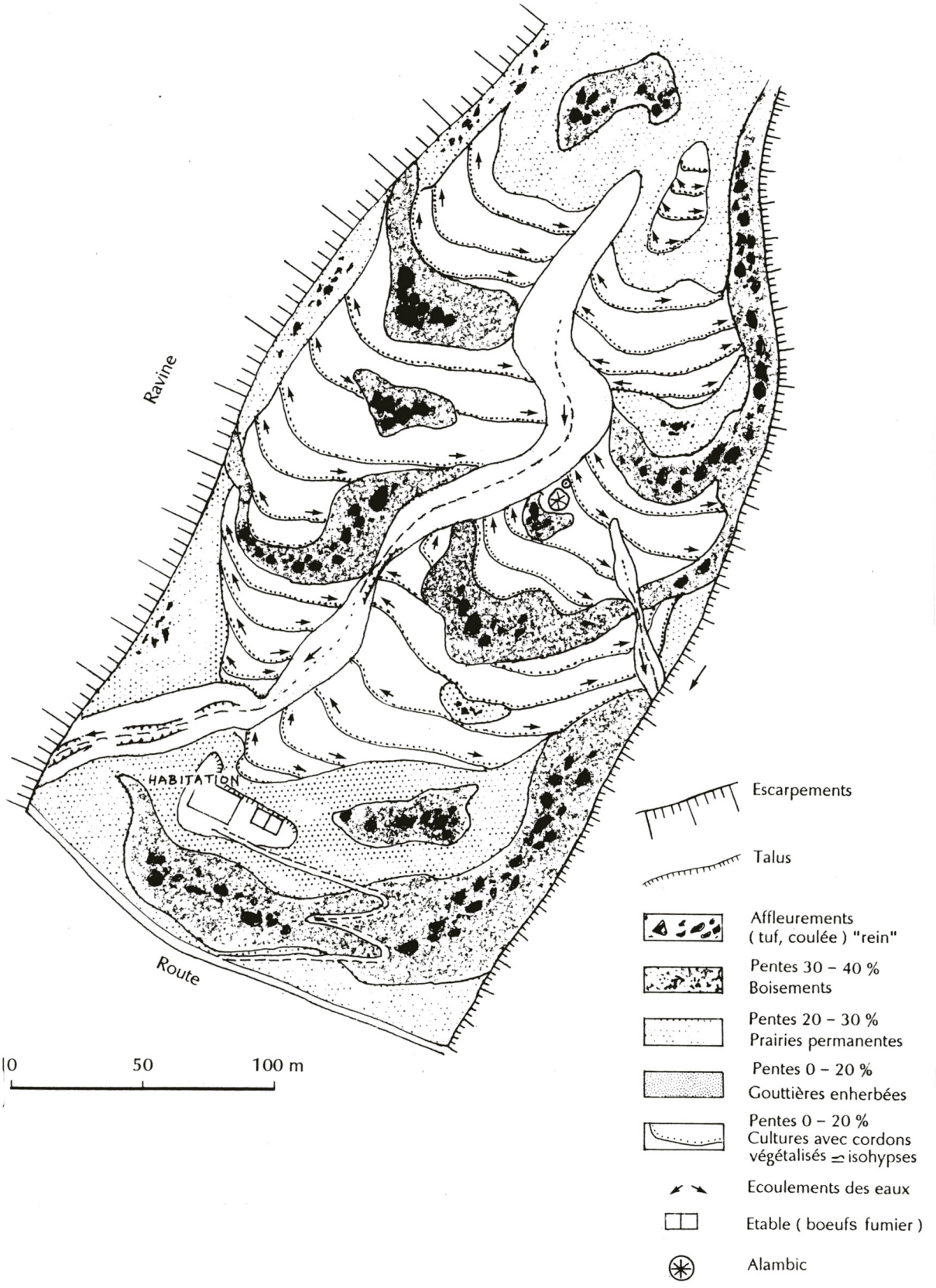
Travail du sol et mécanisation

Le choix optimisé d'une mécanisation dans les andosols des hauts de la Réunion est difficile car il est conditionné par beaucoup de paramètres. C'est un objectif de recherche du CIRAD (A.3) (CEEMAT (A.3) et IRAT (A.3)). Ce choix doit en effet tenir compte de facteurs physiques (nature des sols et pentes), fonciers (taille, accessibilité des exploitations, mode de faire-valoir...), socioéconomiques (coût de production, disponibilité en main-d'oeuvre, technicité de l'exploitant...) et bien entendu des types et systèmes de cultures.

Nous nous placerons ici dans le contexte des systèmes «géranium-maraîchage-cultures vivrières-arboriculture» ou maraîchage seul. Nous sommes en effet généralement au-dessus de la zone sucrière et en dessous de la zone élevage. Nous considérons aussi que le défrichement forestier a déjà été réalisé (excepté pour quelques vieilles jachères à Acacia) et qu'il n'y a pas de besoins d'épierrage, ce qui est te cas général sur les andosols du Piton des Neiges.

Concernant le foncier, dans l'ouest, le cas le plus général est encore le colonage sur des exploitations inférieures à 2 hectares, bien que le remembrement SAFER (A.3) favorise de plus en plus la propriété de 4 hectares. Dans le sud (Piton Hyacinthe, Hauts du Tampon), le faire-valoir direct est plus généralisé.

FIG. 6.34 – *Schéma d'aménagement d'une exploitation de 4 hectares*



(.jpg)

Concernant la traction supérieure à 30 CV, on peut dire que

- si la pente générale est relativement régulière, 25 % est la limite supérieure (en humide) pour les tracteurs à 4 roues motrices ou à chenilles. Ces derniers sont préférables car elles patinent moins et perturbent moins le sol,

- si la pente est irrégulière, cette limite descend à 18 %.

Le motoculteur à chenilles peut aller au-delà (35 % ?) mais ne peut assurer un labour profond (puissance inférieure à 10 CV).

- Le parcellaire étroit, cloisonné et irrégulier

Aux contraintes «sol» et «pentes» précédentes s'ajoutent les contraintes d'ordre foncier. Les exploitations (souvent enclavées, loin des lieux d'habitation) sont généralement allongées dans le sens de la pente (photo A.26) et étroites (moins de 50 mètres) ; les parcelles ne sont pas géométriques. Les pistes d'accès pour tracteurs et outils sont mal tracées. Les marges de manoeuvre des tracteurs sont faibles, des ravines délimitant souvent directement les parcelles. En plus les cordons végétalisés isohypses anti-érosifs, préconisés tous les 3 mètres de dénivelée, réduiront encore l'espace. Dans de telles conditions les risques de labours très mal faits, plus néfastes qu'utiles, sont grands.

A ces différentes contraintes d'ordre technique et «structurel» s'ajoutent un certain nombre d'inconvénients du labour sur les andosols : le labour favorise la dessiccation irréversible de l'horizon travaillé, induisant, nous l'avons vu, sa micro-nodulation en éléments stables déliés les uns des autres, de densité inférieure à 1, et donc préparés à une érosion rapide. L'horizon de surface se sépare de l'horizon B par une discontinuité qui interrompt la macroporosité donc l'infiltration, accélérant ainsi l'écoulement hypodermique des eaux et l'entraînement vers l'aval de cette couche décollée. Les flux hydriques remontants (capillarité) sont également interrompus et n'alimentent plus la masse racinaire, généralement localisée en surface. S'il n'y a pas d'irrigation d'appoint le cycle de saison fraîche souffre alors de sécheresse.

Il est évident que ces inconvénients du labour sont renforcés dans le cas d'utilisation de houes rotatives du type «rotavator», pulvériseurs type offset, etc.. Ces outils sont particulièrement néfastes dans les andosols. Pourtant le rotavator est très utilisé car il est pratique et rapide pour détruire et enfouir résidus et herbes. Il remplace le labour et il affine suffisamment le sol ce qui est très prisé pour les cultures maraîchères.

Les inconvénients du labour sont donc nombreux. Il ne se justifierait que sur les parcelles à sols «dégradés» (à horizon A déjà décapé) à condition que la pente générale soit inférieure à 20 % et uniquement dans une optique de «régénération» progressive de cet horizon A. Dans ce cas, suite à un décompactage (voir ci-dessus), un labour profond bien fait sera associé à un enfouissement d'amendements calcaires et organiques ainsi que de fumure de fond. Après une reprise pour affinage, le sol sera le plus rapidement possible, occupé (semis ou bouturage) par une prairie à graminées de développement rapide et bien couvrante (kikuyu, Chloris goyana...) qui restera en place plusieurs années avant d'être enfouie en engrais vert.

b) L'alternative au labour et à ses inconvénients : le travail minimum du sol avec couverture permanente.

Les recherches entreprises à la station des Colimaçons par l'IRAT (A.3) (MICHELLON, 1.989 ; DOREE, 1.989) montrent que sur andosol peu dégradé, c'est-à-dire à horizon «Ap» structuré assez épais (plus de 15 cm), le labour n'est pas nécessaire. En effet, l'horizon Ap des andosols ne se compacte pas et la fonction classique d'ameublissement par labour n'est plus pertinente. Le contrôle des adventices et le problème des résidus de récolte peuvent dans la majorité des cas être résolus par des techniques de travail minimum du sol avec semis direct ou sillonnage puis semis (ou plantation) directement sur couverture, morte ou vivante, associées à l'utilisation d'herbicides totaux ou sélectifs.

Par ces techniques, on s'arrange pour qu'à aucun moment le sol, perturbé au minimum, ne soit découvert, assurant ainsi une protection quasi totale contre l'érosion.

- La couverture totale peut être «morte», c'est-à-dire composée des résidus du cycle précédent et de mau-

vaises herbes détruites au désherbant total (paraquat, round-up...). C'est un mulch à travers lequel se fait le semis (et la fertilisation combinée) soit manuellement à la «canne planteuse» (pentes supérieures à 25 %), soit mécaniquement avec un motoculteur (ou minitracteur) équipé d'un sillonneur-semoir adapté, soit mixte (sillonneuse puis semis, plantation ou bouturage, manuels).

Le mulch peut être assuré par une culture spéciale - légumineuse ou graminée (en cycle plein, en intercalaire ou en dérobée) - choisie pour sa fourniture importante de matière sèche, son contrôle des adventices et, si possible, son action améliorante. Ce mulch est intéressant à plusieurs titres: pour la protection du sol, pour le développement d'une microflore et d'une faune favorables et pour la limitation de l'évaporation pendant le cycle de saison sèche. Un problème est que la faible taille des exploitations permet difficilement l'occupation de la parcelle pendant un cycle par une plante non directement productive.

- Mais la couverture totale peut aussi être «vivante» et cultivée alors avec la culture principale. C'est plus compliqué. Des recherches sont entreprises actuellement à l'IRAT (A.3)-Colimaçons, pour déterminer en fonction des cultures, la nature et le mode d'implantation des plantes de couverture. Celles-ci ne doivent pas avoir d'effets allélopathiques pour la culture, mais si possible en avoir vis à vis des adventices. La couverture ne doit pas avoir un port trop haut et luxuriant pour ne pas concurrencer la culture vis à vis de la lumière. Il faut examiner les décalages optima des dates de semis ou de bouturage. Il faut aussi déterminer quels herbicides employer et à quelles doses, afin de «contrôler» cette couverture et d'éliminer les autres adventices sans pour autant nuire à la plante cultivée. D'autre part, un certain nombre d'inconvénients possibles doivent être minimisés, en particulier la prolifération des ennemis des cultures favorisée par le nouveau microclimat. Enfin, il faut trouver des systèmes de semis et de récolte adaptés suivant les spéculations.

Si tout n'est pas réglé des points de vue technique et socio-économique, il est évident qu'une telle approche, si on peut l'«optimiser», présente d'énormes avantages dans le contexte physique et sociologique de la Réunion, en particulier :

- la protection intégrale du sol contre l'érosion,
- la réduction des temps de travaux, par la diminution ou l'élimination des sarclages et désherbages manuels,
- enfin, et cela peut sembler paradoxal, malgré la couverture vivante, la parcelle paraît souffrir moins de sécheresse pendant la saison fraîche, peut-être du fait d'un captage supérieur de précipitations «occultes».
- Cas du maraîchage «intensif»
  Les cultures vivrières ou maraîchères en «intercalaire» de géranium ou associées à une couverture vivante en rotation avec le géranium sont envisageables essentiellement dans les hauts de l'ouest dans le cadre de la diversification des cultures. Les andosols non perhydratés des hauts du sud (Piton Hyacinthe) et du sud-ouest (Hauts du Tampon) sont cultivés en maraîchage plus intensif, en parcelle pures, souvent sur toute l'exploitation et à raison de 2 cycles par an. Il n'est pas sûr que les pratiques précédentes (couverture totale et semis direct) soient alors totalement valables, sans baisse de rendements pour les agriculteurs. Les cultures maraîchères, spécialement celles à petites graines, demandent des semis ou des repiquages de précision sur un terrain parfaitement affiné et propre en permanence. L'utilisation du sillonneur en travail minimum n'est valable que pour les semis de grosses graines (haricot, pois...) et la plantation de tubercules (pomme de terre). D'autre part, il leur faut régulièrement du fumier (ou écumes). Enfin, les légumes sont particulièrement sensibles aux maladies et parasites et n'aiment pas fa concurrence d'autres plantes. Toutes ces exigences sont difficiles à satisfaire avec une couverture et travail minimum du sol.
  Dans ces conditons, une culture maraîchère «pure», peut se réaliser en 1 er cycle (saison sèche) sur des pentes allant jusqu'à 25 %, mais ne devrait jamais être envisagée en 2è cycle (saison des pluies) sur des pentes supérieures à 10 %. C'est le cas le plus courant à Piton Hyacinthe, mais pas dans les hauts nord-est du Tampon où les risques d'érosion sont particulièrement élevés. En saison des pluies, les pentes comprises entre 10 et 25 % ne devraient être cultivées que sur couverture totale du sol et donc pas en maraîchage pur.

De toute façon, quelle que soit la zone il faut trouver une alternative à l'utilisation du «rotavator», très néfaste,

qui «souffle» les sols au-dessus d'une semelle de labour et les prépare à l'érosion. Le labour (bien fait) suivi d'un passage de vibroculteur est un moindre mal.

6.5.16 Les andosols désaturés perhydratés (unités 34 à 39)

Ce vaste ensemble (20 000 hectares) constitue un terme amont de la climato-séquence. Dans la continuité logique des andosols non perhydratés précédents, ils correspondent à une pluviométrie et à une hygrométrie supérieures. Au fur et à mesure que les températures baissent, donc que l'altitude augmente (à partir de 1 500 mètres), des caractères podzoliques

(unités 36) se surimposent aux propriétés andiques. Au nord-est, zone la plus humide, se surajoute également, à partir de 1 300 mètres, une forte accumulation organique pseudo-tourbeuse appelée «avoune» (unités 37 à 39).

La spécificité commune de cette catégorie d'andosols, par rapport aux précédents, est, comme leur nom l'indique, leur très grande richesse en eau (200 à 310 % d'humidité pondérale à saturation), leur conférant des caractères de thixotropie. Ce sont des sols riches en produits cryptocristallins aluminiques (imogolite) et en matière organique (acides fulviques) liée aux amorphes, migrant en profondeur sous forme de complexes organo-métalliques (chélates).

6.5.17 Les andosols perhydratés modaux (unités 34 et 35)

Nous appelons «perhydratés modaux», les andosols qui ne présentent pas encore de podzolisation très manifeste, ni d'accumulation épaisse purement organique en surface («avoune»). Ils sont situés immédiatement au-dessus des «non perhydratés», avec lesquels la transition est progressive et non repérable avec précision sur le terrain.

Ces sols ne sont généralement pas cultivés actuellement, à l'exception de certains secteurs peu accidentés tels Piton Hyacinthe (photo A.46), la Plaine des Makes, la Petite Ferme, Grand Coude (photo A.51), Bellevue. Dans l'ouest (1 300 - 1 600 mètres), ils ont été autrefois cultivés en géranium ; ils sont actuellement soit couverts de boisements secondaires «anthropiques» à Acacia decurrens, soit en cours de défrichement pour l'installation de prairies d'élevage. Seuls les hauts de Bois de Nèfles, du Tevelave et des Makes sont encore en forêt naturelle à «bois de couleur» de la série mésotherme hygrophile. Dans le sud et au centre, une grande partie est également en pâturage (Grande Ferme, Notre Dame de la Paix, Bois-Court, Piton Tortue...), mais on y trouve encore de nombreuses reliques forestières à «bois de couleur». Au nord (en dessous de la Plaine des Fougères), cette forêt est bien représentée, mais elle est de plus en plus «mitée» par les défrichements pour l'installation de pâturages. Enfin, au nord-est, zone la plus arrosée (Plaine des Lianes), la forêt mésotherme est encore pratiquement intacte (sans doute grâce à ses difficultés d'accès).

Modelé et matériaux

Les retombées pyroclastiques sub-terminales de l'activité du Piton des Neiges ont, ici, été peu remaniées, exceptés sur les fronts et bordures très pentus des coulées recouvertes, où des glissements ont eu lieu sur de courtes distances : épaississement (plus de 3 mètres) du manteau cendreux colfuvionné dans les gouttières, amincissement (moins de 1 mètre) sur les flancs des bossellements, où les blocs de «gratons» affleurent fréquemment. Les couches de cendres superposées, non glissées, forment une litation nette, renforcée par différentes teintes dues aux processus bio-physicochimiques de lixiviation - accumulation verticales par les eaux de drainage qui affectent de façon différente les lits suivant leur nature (granulométrie, porosité...). Plusieurs couches superposées peuvent être les lieux de processus semblables ; ainsi la base piège souvent les hydroxydes de fer amorphes (ferrihydrites ?) issus de la lixiviation du haut de la couche et mobilisés par les acides fulviques. Cela se traduit dans la coupe par des bandes rougeâtre récurrentes parallèles. Entre les lits, la discontinuité latérale est souvent remplie par des précipitations ferrugineuses durcies de couleur orangée. De même, les lits cendreux

peuvent avoir des teintes brun chocolat, noirâtre, brun jaunâtre, grisâtre. Le niveau clair de «tuf jaune» (déjà décrit par ailleurs), plus cohérent, est fréquent entre 0,50 et 2 mètres de profondeur.

La topographie du matelas cendreux épouse, en l'amortissant un peu, le modelé des coulées sous-jacentes, particulièrement leurs multiples bossellements (photo A.47), si caractéristiques (comme déjà signalé) des planèzes des «hauts». Les pentes générales sont le plus souvent comprises entre 20 et 30 %. Dans le détail, les versants sont très irréguliers du fait des bossellements. Ainsi, une pente générale de 25 % est coupée de nombreux replats (à moins de 10 %) et ressauts (plus de 30 %) ; les courbes de niveau sont donc extrêmement sinueuses. A cette topographie «naturelle» (surface d'écoulement des laves imbriquées) se superposent les nombreuses et profondes entailles des ravines sub-parallèles, qui lacèrent les planèzes tous les 100 à 400 mètres, les découpant en étroits panneaux (photo A.52).

Les zones relativement peu accidentées, à pentes générales inférieures à 20 %, donc les plus intéressantes pour l'agriculture, représentent environ 2500 hectares (unité 34) contre 7 500 hectares pour les secteurs à pentes supérieures à 20 % (unité 35) ; il s'agit des régions suivantes :

- au nord et au nord-est : la Plaine d'Affouches (60 ha), la Plaine des Fougères (150 ha), les Deux Mamelles (60 ha), Bellevue/Lianes (275 ha), Le Trou Malais (90 ha).
- au centre et au sud : le Piton Tortue (300 ha), le Dimitile (75 ha), Bois Court (75 ha), Piton Hyacinthe (160 ha), la Grande Ferme (250 ha), Notre Dame de la Paix (275 ha), Grand Coude (325 ha).
- à l'ouest : la Plaine des Makes (400 ha).

Les sols

Etant formés sur le même matériau cendreux que les andosols non perhydratés, ils présentent un grand nombre de leurs caractéristiques. Ces dernières ayant été déjà longuement présentées, nous nous contenterons de les rappeler, mais insisterons davantage sur les caractères qui permettent de les distinguer. Le passage des uns aux autres se fait par un gradient progressif conforme, pour une exposition donnée, au gradient altitudinal.

1. Morphologie
   L'épaisseur du sol est celle du recouvrement pyroclastique ; elle est donc en règle générale, de 2 à 3 mètres. Sur les flancs pentus des bosses, rides et bourrelets, elle est plus faible, souvent inférieure à 1 mètre, avec affleurements discontinus des coulées sous-jacentes. L'héritage des dépôts lités successifs est toujours très net et commande en grande partie la morphologie. Il n'est pas rare (photo A.36), dans les tranchées, de voir sur 4 mètres d'épaisseur, une quinzaine de lits pyroclastiques superposés parallèles, de 20 à 30 centimètres d'épaisseur chacun, l'ensemble épousant la topographie. Les teintes les plus courantes sont brun-rouge (accumulations d'hydroxydes de fer), chocolat foncé, brun jaunâtre et beige clair (tufs). Les processus bio-géochimiques qui affectent les cendres litées sont donc en partie répartis en fonction de cette structure litée qui «recoupe» et perturbe le gradient normal d'entrainement vertical par les eaux d'infiltration. Les processus sont révélés par des couleurs différentes qui renforcent ainsi la morphologie litée.
   Dans leur état d'humidité naturelle, les perhydratés ont une structure continue (absence de macro-agrégats naturels) en dessous de l'horizon de surface. Ils présentent un aspect «gras», presque huileux. Au toucher la consistance est friable, légère et «onctueuse»; la texture apparaît limono-argileuse, sans plasticité. Les caractères de «thixotropie», nets, dus au passage brutal de la limite de liquidité par le matériau gorgé d'eau, se manifestent de la façon suivante
   Test «du couteau» : quand on enfonce brusquement une lame de couteau, celle-ci rentre sans résistance, comme dans du beurre, jusqu'à la garde. Par contre, le sol oppose une résistance au retrait de la lame.
   Test du malaxage : une motte, triturée à la main de façon énergique, libère brutalement son eau et devient gluante.
   Au champ : un engin lourd est susceptible, lorsque le sol est saturé, de s'enfoncer brusquement, faute de portance suffisante. Nous reviendrons sur cet aspect important qui constitue une contrainte rhéologique

(géotechnique et agronomique) spécifique des andosols perhydratés.

L'aspect des tranchées de route sur cendres épaisses à andosols perhydratés est assez caractéristique. La stabilité des coupes est très bonne ; il y a très peu de glissements. Le dessèchement des parois au soleil se traduit par une desquamation en plaquettes polyédriques, de 1 cm d'épaisseur, durcies très légères, de couleur chocolat foncé, formant un craquelage régulier en «peau de crocodile» (ou en «croûte de pain»), sans fissuration verticale. Cette croûte, qui a subi une déshydratation irréversible la rendant hydrophobe, reste permanente quelque soit la saison. En dessous, le sol, protégé de l'évaporation reste très humide, friable, avec une structure continue et conserve les «vraies» propriétés du matériau andique.

2. Les caractéristiques chimiques :
   - Matière organique

     L'horizon humifère, sous végétation naturelle et sans «avoune» (voir plus loin), d'une épaisseur de 20 à 30 cm, possède une teneur en matière organique de 15 à 30 % (variant dans le même sens que l'altitude), donc encore supérieure à celle des andosols non perhydratés (unités 32 et 33). Le taux d'azote, compris entre 5 et 8 , varie en sens inverse de l'altitude.

     Le rapport C/N, indicateur d'un faible état d'humification de cette matière organique, est généralement élevé (16 à 21) surtout au-dessus de 1 500 mètres d'altitude. Sous prairie, il descend en dessous de 15 du fait du réveil d'une certaine activité biologique.

     En dessous de 20/30 cm et jusqu'à 2 mètres de profondeur, le taux de matière organique reste toujours très élevé. A 1 mètre, il y en a encore entre 9 et 15 %. Le rapport C/N est de l'ordre de 20-25.

     Concernant les proportions relatives d'acides humiques (AH) et fulviques (AF), le rapport AF/AH augmente nettement de la surface vers la profondeur. De l'ordre de 2 dans l'horizon A, il peut être de 4 à un mètre de profondeur. Cela traduit la migration préférentielle des acides fulviques, plus solubles, probablement sous la forme de chélates. Ce processus s'intensifie avec l'altitude, surtout à partir de 1 500 mètres, en relation avec le ralentissement de l'activité biologique et donc de l'humification. A partir de 1600 mètres, on pourra parler de «crypto-podzolisation» (voir plus loin).
   - pH

     Les perhydratés sont plus acides que les non perhydratés.

     Dans l'horizon A, le pH-eau est compris entre 4,6 et 5 et le pH-KCI entre 4,9 et 5,3 (opH = 0 à -0,3). En profondeur, le pH-eau est de l'ordre de 4,5 à 4,7, alors que le pH-KCI est compris entre 4,9 et 5,9 (opH = 0,5 à -1,3). Le epH est donc toujours négatif et témoigne d'une forte capacité d'échange anionique des constituants alumineux amorphes (imogolite, allophanes, hydroxydes). De même, le «test de FIELDES et PERROTT», est toujours fortement positif ; au contact d'une solution de NaF, il se développe une rapide alcalinisation : le pH-NaF est de 8,6 à 9,2 en surface, et de 9,5 à 11 en profondeur.
   - Complexe adsorbant

     La charge, négative et positive, des colloïdes est très dépendante du pH de la solution.
     - La capacité d'échange cationique (CEC) effective mesurée par la méthode «cobaftihexamine» au pH du sol (non séché) est encore plus faible que dans le cas des andosols non perhydratés : 8 à 10 mé/100 g de sol dans l'horizon A (0-25 cm), 3 à 6 mé en profondeur. Pour donner une idée de la charge variable en fonction du pH, signalons que dans une solution à pH 7, la CEC mesurée est alors de 50 à 70 mé/100 g. Au pH du soi, la répartition des bases sur le complexe est la suivante :
       - en «A» :
         - Ca = 1 à 3 mé,
         - Mg = 0,5 à 1,3 mé
         - K = 0,1 à 0,3 mé,
         - Na = moins de 0,05 mé
         - Al = 1 à 3 mé
         - Saturation V= 30 à 50%

  - en «B» :
    - Ca = 0,1 à 0,3 mé,
    - Mg = 0,1 à 0,2 mé
    - K = 0,01 mé,
    - Na = moins de 0,02 mé
    - Al = 0,5 à 1 mé
    - Saturation V = 5 à 10%

  Ces sols sont donc très désaturés.
- La capacité d'échange anionique (AEC)
  Le pH correspondant à une charge nulle (ZPC), proche de 5,5, est toujours supérieur (au moins d'une demi-unité dans les horizons B) au pH du sol, ce qui indique que l'AEC est toujours très supérieure à la CEC.
  L'AEC, bien qu'elle n'ait pas été mesurée directement, doit, compte tenu de sa richesse en constituants aluminiques amorphes (imogolite et hydroxydes), être particulièrement élevée (jusqu'à 30 mé?)

- Aluminium échangeable - Acidité d'échange
  Les cations échangeables concernent aussi l'aluminium (forme AI+++) et les protons. La somme (AI+++ + H+) est appelée «acidité d'échange».
  L'aluminium dit «échangeable» (dosé par colorimétrie après déplacement par une solution de KCI - N) et l'acidité d'échange (titration à la soude) donnent, pour les perhydratés,les valeurs moyennes suivantes :

  - dans l'horizon A (0-25 cm)
    AI+++ = 1 à 4 mé/100 g
    AI+++ + H+ = 2,5 à 5,8 mé/100 g
  - dans les horizons B
    AI+++ = 0,5 à 1 mé/100 g AI+++ + H + = 1,7 à 2,5 mé/100 g

  En altitude (au-delà de 1 600 mètres), les perhydratés, lorsqu'ils sont affectés par une «cryptopodzolisation», montrent des valeurs plus basses en.A et nettement plus élevées en B (jusqu'à 5 mé) sur des tranches de 10 à 15 cm, entre 25 et 60 cm de profondeur. Il s'agit alors d'une migration de complexes organo-aluminiques, à partir de la surface (l'aluminium dosé n'est peut être pas alors «in situ», sous la forme AI+++).
  Le «taux d'acidité d'échange» (TAE), rapport de l'acidité d'échange à la somme des cations échangeables, a donc les valeurs suivantes :
  en A (0-25 cm): TAE = 45 à 65 en B (25-100 cm) : TAE = 25 à 90
  Ce sont des valeurs élevées, qui traduisent une tendance des andosols perhydratés, du moins en altitude, à la podzolisation.
- Phosphore
  Les andosols perhydratés sont très riches en phosphore total. Dans les 20 premiers centimètres, on en dose 2 000 à 4 000 ppm. Entre 20 et 100 cm, il y en a encore 1 500 à 2 500 ppm. Ce phosphore est lié à l'aluminium, au fer et à la matière organique, éléments très abondants dans ces sols.
  Le phosphore dosé par la méthode «OLSEN modifiée DABIN» (extraction NH4F) et souvent qualifié d'«assimilable», indique 100 à 400 ppm en surface, 50 à 200 ppm en profondeur, valeurs encore relativement élevées. Pourtant l'expérience montre que les plantes ne peuvent utiliser ce phosphore. La raison principale en est la forte capacité d'échange anionique des amorphes (imogolite, hydroxydes de fer et d'aluminium). Une autre raison est la très faible activité biologique, qui ne permet pas la libération du phosphore piégé dans les complexes fulviques, eux-mêmes fortement liés à la matière minérale. Ainsi dans les perhydratés, le problème du blocage du phosphore se pose de façon encore plus aigüe que dans le cas des non perhydratés.

3. Les caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques

   – Granulométrie

   Nous avons déjà indiqué que la notion de granulométrie était difficile à définir dans le cas des andosols. Les classes obtenues en laboratoire sont «créées» pendant la préparation et la dispersion des échantillons. En effet, la durée et la température de séchage préalable ainsi que l'intensité de la dispersion, conditionnent les proportions de ces classes.

   Les méthodes traditionnelles, desséchant préalablement les échantillons, donnent donc pour les andosols, des résultats très éloignés de la réalité in situ.

   Il suffit de rappeler quelques résultats de PENSEC (1987) : pour un même traitement aux ultra-sons, un même échantillon passe d'une «texture» argilolimoneuse s'il n'a pas été desséché, à une texture fortement sableuse s'il est desséché à 30 ° C pendant 7 heures.

   Ces propriétés tiennent, comme nous l'avons vu (Fig. 6.24 et Fig.'6.25) à l'évolution de la microstructure emboîtée («fractale») du matériau, sous l'effet des contraintes hydriques. A partir de pF 4, donc bien avant le stade du séchage à l'air, toutes les classes de particules et porosités emboîtées subissent de fortes réorganisations (irréversibles), avec contractions et effondrements puis accrétions en pseudo-sables.

   – Rétentions en eau - densités - porosités

   L'humidité pondérale (Wp), entre pF 1,8 et pF 2,5 (correspondant aux conditions «naturelles»), est extrêmement élevée dans ces sols puisqu'elle est comprise entre 150 et 300 % (rapportée au poids de sol sec, séché à l'étuve). A pF 4,2, cette humidité est encore de 100 à 200 % (tab. 6.2). Un séchage à l'air (pF 5,8 environ) laisse encore 20 à 35 % d'eau.

   La densité apparente (da) est toujours très faible, entre 0,3 et 0,5. Dans la gamme de réversibilité (jusqu'à pF4 environ), elle est en relation linéaire avec l'humidité pondérale. C'est une caractéristique des andosols (MAEDA et al, 1977).

   Dans ces conditions, l'humidité volumique (Wv) est de l'ordre de 70-90 % à pF 1,8 et de 50-70 % à pF 4,2.

   La densité réelle est comprise entre 2,7 et 3,0 (avec 2,8 pour valeur moyenne). Ce sont des valeurs particulièrement élevées (comparées aux sols non andiques) surtout si on considère les fortes teneurs en matière organique ; elles pourraient s'expliquer par la présence de minéraux lourds résiduels dans les cendres altérées, tels la magnétite et le titane. Des granules de Ti02 ont été bien identifiées dans les nano-agrégats élémentaires (L. DENAIX, 1989).

   La porosité occupée par l'air (a %) est par conséquent très faible, probablement inférieure à 10 % dans les horizons B. Cette valeur de 10 est souvent considérée comme un seuil en dessous duquel le développement racinaire est empêché. Les andosols perhydratés, davantage encore que les non perhydratés, doivent se comporter, même sur pentes fortes, comme des sols hydromorphes saturés en permanence. Leur vocation est donc la prairie graminéenne, dont l'enracinement est localisé dans les 25 cm supérieurs, habités par une macroporosité biologique.

   Ces sols sont en fait plus difficile à utiliser que des sols hydromorphes «classiques» engorgés par une nappe drainable. Ici, la vidange des micropores n'est pas possible par drainage artificiel, compte tenu de la forte énergie de rétention de l'eau, dont 70 % du volume total occupe des pores de moins de 1 μm de diamètre (correspondant à des pF supérieurs à 4). Ceci peut paraître étonnant quand on sait que la perméabilité verticale des andosols est très élevée.

   Même à «saturation», il subsiste une porosité à l'air, irréductible, probablement interne aux «nano-agrégats», qui serait de l'ordre de 1 à 3 %.

   – Perméabilité

   A saturation et en conditions normales d'humidité (en dessous de pF 1,8 en général), la perméabilité (Ks) des andosols est très élevée (plusieurs centaines de mm/heure). L'eau circule extrêmement vite dans la porosité «supérieure» (pores supérieurs à 10 μm) par effet piston. S'il n'y a pas d'obstacle profond (coulée en dalle par exemple), les perhydratés, dans leur état physique et hydrique naturel, absorbent sans difficulté les pluies de forte intensité, empêchant l'érosion de surface. Mais si le sol est excessivement travaillé ou desséché, il se crée, comme nous l'avons vu, une évolution défavorable qui tend à former une micro-agrégation plus ou moins hydrophobe et une rupture de

capillarité avec la profondeur. L'infiltration des pluies est alors très fortement ralentie, entraînant des processus d'érosion.

– Limites d'Atterberg

Rappelons que, classiquement, en mécanique des sols (rhéologie), on apprécie 3 états de comportement (ou «consistance») d'un sol suivant sa richesse en eau :

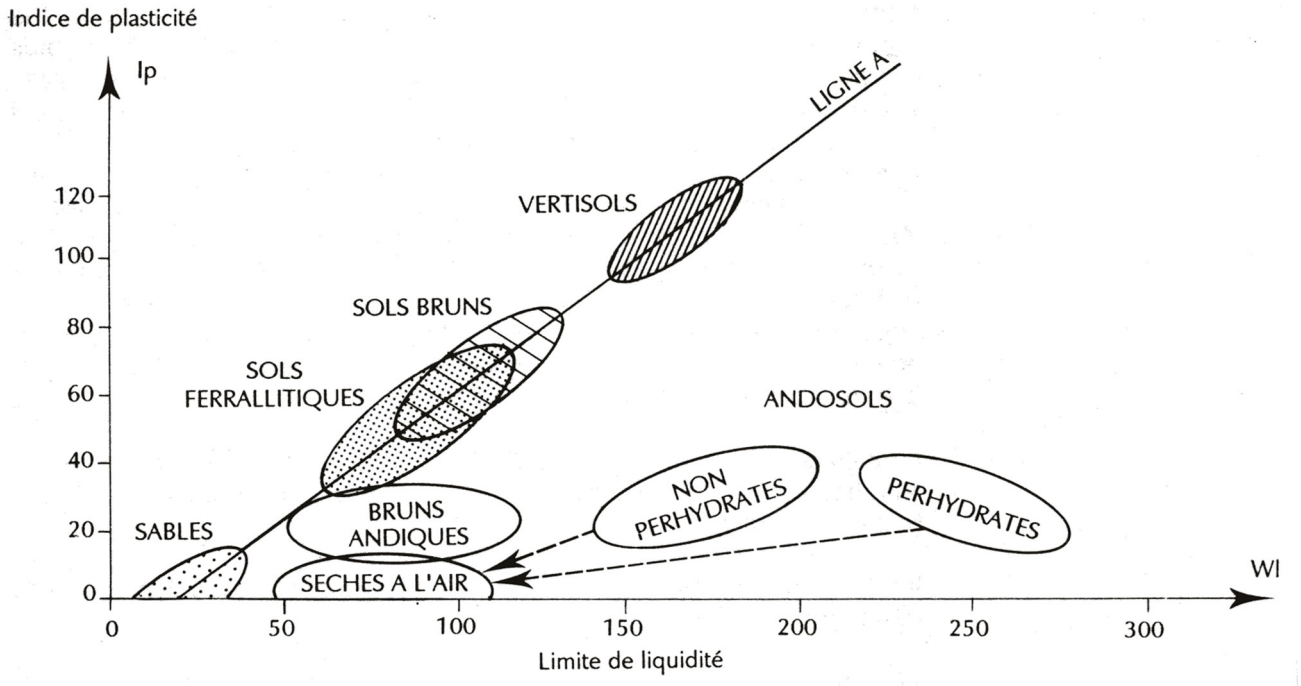
- l'état solide (ou «fragile»),
- l'état plastique,
- l'état liquide.

A l'état solide, le sol peut se rompre sans déformation ; il est bien rigide. Ses éléments ne peuvent se ressouder par pétrissage ; on peut l'écraser et le réduire en poussière.
A l'état plastique, le sol se déforme sans rupture et sans revenir à l'état initial. Des morceaux peuvent se ressouder par pétrissage.
- A l'état liquide, le matériau s'étale parfaitement sur une surface plane bien mouillable en un film très fin.
Pour apprécier les changements d'état et comparer les sols entre eux, ATTERBERG (1911) a imaginé une série de tests standard permettant de «mesurer» les humidités de passage d'un état à l'autre. C'est ce qu'on appelle les limites d'Atterberg, couramment utilisées en études géotechniques. Ce sont :

- la limite de plasticité (Wp), séparant l'état solide de l'état plastique,
- la limite de liquidité (WI), séparant l'état plastique de l'état liquide.

L«'étendue» de l'état plastique peut se caractériser par l'indice de plasticité Ip = WI - Wp.
Si on place sur le «diagramme de Casagrande» (Fig. 6.35) les sols «classiques» non andiques (à argiles phylliteuses) en fonction des deux coordonnées WI et Ip, l'expérience montre qu'ils sont regroupés selon une corrélation linéaire le long d'une droite, dite «ligne A» d'équation : Ip = 0,73 (Wl - 20).

FIG. 6.35 – *Position des andosols de la Réunion (horizon B) sur le diagramme de Casagrande*



(.jpg)

Les sols sableux, sans plasticité, sont situés tout à fait au bas de cette droite, alors que les sols les plus argileux très plastiques (Ip élevé) sont en haut.

V. ROSELLO (1984) a situé les andosols de la Réunion sur ce diagramme. On constate qu'ils sont tous très loin en dessous de la ligne A, ce qui confirme leurs caractères très «anormaux». Les limites de liquidité (d'échantillons non séchés à l'air) sont très élevées, entre 150 % et 280 %. Les indices de plasticité sont compris entre 20 et 60, ce qui est assez faible et dû au fait que les limites de plasticité sont élevées. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus par WESLEY (1973) sur des andosols de Java.

Plus le point caractéristique est proche de la ligne A, moins le caractère andique est prononcé. Si on opère sur des échantillons andiques préalablement séchés à l'air, l'indice de plasticité chute très fortement ou n'est plus mesurable et la limite de liquidité est divisée par 2. On se rapproche alors du comportement des sables. Ceci est une autre manifestation de l'irréversibilité de la déshydratation à des pF supérieurs à 4. D'autre part MAEDA et al (1976) ont montré que la matière organique a un effet positif sur l'augmentation de la limite de liquidité ainsi que sur la limite de plasticité. Ainsi WI augmente de 1,5 à 3 % pour une augmentation de 1 % de matière organique.

Les perhydratés de la Réunion, les plus riches en matière organique et en constituants minéraux amorphes, ont leur limite de liquidité la plus élevée, de 150 à 300 %.

– Thixotropie

Le caractère de «thixotropie» est spécifique des andosols perhydratés. La thixotropie est une «liquéfaction» localisée et fugace qui se traduit lorsqu'on rentre dans le sol un outil en appliquant une forte pression en très peu de temps, sous forme d'une impulsion brutale. C'est uniquement pendant le mouvement et autour de la pression appliquée, dans la zone la plus comprimée, que l'on atteint brusquement la limite de liquidité. Par exemple, autour d'un couteau rapidement enfoncé, se crée un fin manchon liquide qui fait chuter, pendant cette impulsion, les résistances de frottement. A ce moment et à cet endroit, le matériau se comprime, la concentration locale en eau pondérale augmente alors suffisamment pour atteindre la limite de liquidité. Dès qu'on arrête la pénétration de la lame, ou qu'on ralentit le mouvement, l'enveloppe boueuse liquide disparaît par dissipation rapide des contraintes dans le milieu et récupération de l'état antérieur. Le sol oppose ensuite une résistance inattendue au retrait de cette lame. Quand on enfonce lentement et régulièrement celle-ci la résistance est la même et la thixotropie ne se manifeste alors pas.

Le même processus, à une autre échelle, peut se produire sous les roues d'un tracteur qui, s'il n'y a pas de substrat dur peu profond, s'enfonce alors brutalement, faute d'une «portance» suffisante.

Il n'existe pas de test permettant de quantifier cette propriété dynamique de thixotropie.

– Portance

En génie civil, l'aptitude d'un sol saturé à supporter un engin s'exprime par un facteur de portance F calculé sur un échantillon

$$F = \frac{4250}{Ip.Wl}$$

Plus F est élevé plus le matériau meuble est «portant». Ainsi un sable a une portance très élevée (de l'ordre de 10) et une argile gonflante une portance très faible (de l'ordre de 0,25). Les sols suivent le même ordre que sur la «ligne A» du diagramme de Casagrande (Fig. 6.35).

Appliqué à l'horizon B des andosols, F varierait de 0,3 à 0,8 pour les perhydratés et de 0,5 à 2,7 pour les non perhydratés (3,5 pour les bruns andiques).

Si on se fie seulement à cet indice, les perhydratés seraient plus «portants» que les vertisols. Or dans la réalité, on constate que c'est l'inverse. En effet, F est un paramètre statique qui ne peut rendre compte du caractère dynamique quasi-instantané qu'est la thixotropie et qui, pour les perhydratés, se surajoute à un faible indice de portance.

4. Minéralogie

Les travaux de V. ROSELLO (1984) et L. DENAIX (1989), en liaison avec le laboratoire des sols de l'INRA (A.3) (Versailles), ont permis d'identifier et d'estimer les proportions en éléments minéraux contenus dans le pédoplasma des horizons B des andosols formés sur les cendres du Piton des Neiges. Ces

résultats ont été obtenus en combinant et recoupant ceux de diverses méthodes : diagrammes de diffraction aux rayons X (pour les minéraux cristallisés), diagrammes d'analyses thermo-différentielle et spectromètre infra-rouge (pour l'halloysite et la gibbsite surtout), observations en microscopie électronique à transmission (pour l'identification des constituants amorphes), analyses chimiques après dissolutions sélectives par l'oxalate d'ammonium à pH 3,5 et par le pyrophosphate de sodium 0,1 M. La méthode chimique permet, par dosage de Al_2O_3 et SiO_2 supposés extraits quasi exlusivement des «amorphes», de reconstituer les proportions d'alumino-silicates para-cristallins (allophanes au sens large).

TAB. 6.6 – *Estimation quantitative des éléments totaux dans les andosols vers 1 mètre de profondeur* (exprimés en % de poids sec)

%	Mat. org.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2/Al_2O_3
ANDOSOLS NON PERHYDRATES	5-10	15-20	40-50	25-35	2-6	0,4-0,5
ANDOSOLS PERHYDRATES NON PODZOLISES	10-15	6-15	30-40	30-35	6-9	0,2-0,4

Par rapport aux non perhydratés (tab. 6.7), les perhydratés sont plus riches en alumino-silicates paracristallins, et en ferrihydrite (système paracristallin Fe_2O_3 - SiO_2 - H_2O). Ils sont un peu moins riches en gibbsite, celle-ci étant en grande partie mal cristallisée. Ils semblent plus pauvres en goethite et dépourvus quasiment d'halloysite. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 (tab. 6.6) est faible dans les horizons B (30-100 cm), de l'ordre de 0,4 (V. ROSELLO, 1984).

TAB. 6.7 – *Estimation des compositions minéralogiques des andosols sur cendres du Piton des neiges*

	ANDOSOLS NON PERHYDRATES	ANDOSOLS PERHYDRATES
Imogolite + allophane + allophane-like	20 à 40 %c	40 à 60 % (Imogolite dominante)
Ferrihydrite (+ hyd. Fer amorphes)	10 à 20 %	20 à 30 %
Gibbsite	20 à 40 %	20 à 30 (mal cristallisée)
Goethite (+ maghemite + magnetite)	10 à 25 %	0 à 10 % (mal cristallisée)
Halloysite	5 à 10 %	0 à 5 (glomérulaire)

Les proportions relatives d'allophane et d'imogolite sont difficiles à estimer. Il semble que la proportion d'imogolite(plus riche en alumine) augmente assez régulièrement avec l'altitude. Elle serait alors prédominante dans les perhydratés. L'allophane proprement dite (glomerulaire), en plus faible quantité, serait de l'allophane alumineuse peu polymérisée de rapport SiO_2/Ai203, proche de 0,6 (L. DENAIX, 1989). Elle serait associée à de l'«allophane-like» (au sens de WADA, 1977) à faible rapport SiO_2/Al_2O_3 (0,3 à 0,4).

Le tableau 6.7 permet de comparer les compositions minéralogiques des andosols perhydratés et non perhydratés vers 1 mètre de profondeur. Il s'agit de fourchettes provisoires qui pourront être précisées ou corrigées ultérieurement.

5. Microstructures

Contaritrement aux andosols non perhydratés, les perhydratés de la Réunion n'ont pas donné lieu à des études ultra-microscopiques. On peut cependant supposer que leurs micro-porosités son structurées sur le même modèle.

En effet, beaucoup de leurs propriétés sont, non seulement comparables, mais exacerbées pour les perhydratés : hyperhydratation, dessèchement irréversible (avec contraction en «pseudo sables» très érodibles),

très faible densité apparente, très grande richesse en «amorphes», structuration continue à l'état naturel, etc.

Ces propriétés ont précédemment été mises en relation étroite avec l'existence d'une structuration emboîtée de type «fractal», c'est-à-dire autosimilaire à différentes échelles (Fig. 6.24), avec des éléments globulaires ou floconneux développant des porosités de plus en plus fines, depuis la porosité biologique (100-1 000 N.m) jusqu'à la porosité inter-nanoagrégats puis intra «particules allophaniques» (5 - 10 Å). La très grande richesse en eau des andosols perhydratés est liée à une porosité totale très élevée (81 à 89 %).

Concernant l'évolution des microstructures sous l'action de contraintes hydriques et mécaniques, nous renvoyons donc le lecteur à ce que nous avons dit au sujet des andosols non perhydratés. Les processus sont les mêmes ; il est cependant possible que certaines «valeurs-seuil» soient un peu différentes compte tenu des différences spécifiques mentionnées.

Quelques aspects agronomiques

Les perhydratés sur cendres du Piton des Neiges sont situés exclusivement dans les «hauts» de l'ouest (au-dessus de 1 400 mètres) et au sud-ouest (au-dessus de 1 100 mètres. Leur «vocation» naturelle est la prairie d'élevage (élevage laitier ou naisseur).

Les problèmes agronomiques sont donc liés essentiellement à l'installation et à l'entretien des pâturages, aux défrichements qui peuvent les précéder. Ils ont pour origine certaines propriétés défavorables des andosols perhydratés, à savoir :

- la thixotropie entraînant une faible portance,
- l'excessive teneur en eau,
- la forte acidité et la toxicité aluminique,
- la faible activité biologique,
- la faible aération du sous-sol,
- la topographie accidentée.

1. Les défrichements

   Il s'agit en général d'une végétation «secondaire», sur vieilles jachères, composée d'arbustes ou d'arbres de diamètres inférieurs à 15 cm : Acacia decurrens, goyaviers, branles, bringelliers, galaberts, ajoncs, fougères... Le plus fréquemment à la Réunion, on pratique le défrichement mécanique au bulldozer équipé d'un «ripper» de dessouchage à l'arrière et d'une lame ou d'un rateau («fleco») à l'avant, poussant la végétation et la rassemblant en andains. Le défrichement mécanique est subventionné à 75 % par l'Etat et a donc la faveur des agriculteurs. Il est opéré par des organismes «reconnus» tels la SICAA.3 PROMOCANNE ou la REDETARA.3(Régie Départementale des Travaux Agricoles et Ruraux). Or, le travail au bull est très néfaste aux andosols pour diverses raisons :

   - Le poids de l'engin

     Il est généralement excessif sur ces sols toujours très humides et à faible portance. Le bull peut s'enfoncer en chamboulant le matériau. De plus, nous avons vu (travaux de ROSELLO, 1984 et PERRET, 1988) que les andosols, s'ils sont, par rapport à d'autres sols, quantitativement assez peu sensibles au compactage (d'après les tests «PROCTOR»), le sont qualitativement beaucoup plus. Ainsi, dans les horizons de surface, la porosité à pores supérieurs à 10 mm est la première touchée. Cette porosité représente de l'ordre de 10 à 20 % de la porosité totale mais assure l'infiltration rapide de l'eau. De plus, les pores de 0,3 à 10 Nm passent dans la classe 0,1-0,3 gm qui retient très énergiquement l'eau (pF supérieur à 4,2). Il s'ensuit qu'après le passage du bull, le sol perd beaucoup de sa perméabilité (donc devient sensible à l'érosion) et de sa disponibilité en eau pour les systèmes racinaires. L'aération est également diminuée et passe probablement en dessous du seuil admissible pour les racines.

– La perturbation de l'horizon de surface
Le travail sur sol toujours très humide, généralement bosselé, entraîne le plus souvent un remaniement important des couches superficielles. L'extirpation des souches, soit au ripper en même temps que les blocs, soit par la poussée de la lame, entraîne une forte quantité de terre collante. Celle-ci est ensuite poussée sur les andains avec la végétation. Si le modelé est irrégulier, les bosses sont particulièrement râpées.
Les chauffeurs de bull travaillent le plus souvent dans le sens de la pente, préparant ainsi le sol à une érosion accélérée, s'il n'est pas couvert rapidement par la prairie. Or, c'est ce qui arrive le plus souvent, l'herbe ayant du mal à s'implanter sur l'horizon B mis à nu et lissé.

Dans ces conditions, l'alternative du défrichement au bull pourrait être l'utilisation d'une débroussailleuse-broyeuse à axe rotatif horizontal, portée à l'arrière d'un tracteur et dont la hauteur de coupe est réglable. Ce type de matériel ne perturbe pas le sol et fragmente la végétation. Il est cependant fragile et n'est utilisable que sur pentes relativement faibles (inférieures à 25%), si la surface n'est pas encombrée de blocs, et pour les taillis à végétation de diamètre inférieur à 10 cm.
Pour les taillis supérieurs (goyaviers, acacia...), il faut compléter par un défrichement manuel à la tronçonneuse à chaîne, portée en bandoulière. Sur les pentes fortes, le défrichement entièrement manuel, malgré le temps plus long et la pénibilité du travail, est fortement recommandé. Pour cela, il faudrait qu'il soit subventionné au même titre que (ou en remplacement) du défrichement mécanique. D'autre part, le contrôle par la DAFA.3 de la bonne conduite des chantiers de défrichement devrait être renforcé.
La plupart du temps, il restera le problème de la mise en andains des débris et le problème des souches, avant l'implantation de la prairie. Si les grosses souches sont coupées au ras du sol, le bull (le moins lourd possible), équipé d'une lame ou d'un râteau, peut passer pour pousser et rassembler les débris, en prenant soin de ne pas racler de terre. Ceci uniquement dans les zones les moins humides (versant occidental) et en saison «sèche». Dans les zones perhumides (nord-est, Grand-Coude), il est préférable de faire le nettoyage en manuel et cela demandera donc beaucoup plus de temps.
L'enfouissement des débris végétaux éclatés par la débroussailleuse-broyeuse ne paraît pas indiqué avant l'implantation des prairies, le sol étant alors trop soufflé.
Les andains doivent être alignés en cordons suivant les courbes de niveau, à peu près tous les 3 mètres de dénivellation, en ménageant des ouvertures en quinconces pour le passage ultérieur des tracteurs. Ils servent ainsi d'écrans anti-érosifs. Ils peuvent éventuellement être brûlés au bout de 5 années puis remplacés par des cordons «vivants», herbacés ou arborés, dont les espèces - fourragères ou fruitières si possible - seront choisies en fonction de l'altitude.

2. L'implantation des prairies (photos A.27, A.35, A.47, A.51)
Des contraintes importantes existent :

– l'acidité des sols (particulièrement défavorable aux légumineuses),
– le drainage de surface pour les zones à faible pente,
– la sensibilité à la dégradation et à l'érosion,
– les difficultés de la mécanisation.

Après un défrichement de vieille jachère, l'installation d'une prairie couvrante ayant une bonne pérennité est chose délicate sur andosol perhydraté.
- Les espèces fourragères
Au-dessus de 1 200 mètres d'altitude, la seule graminée fourragère tropicale vivace adaptée est le Pennisetum clandestinum (kikuyu) que l'on peut implanter soit par boutures, soit par semis. Les autres espèces vivaces possibles, sont d'origine tempérée et ont été introduites en 1971 : Festuca arundinacea (fétuque élevée), Dactylis glomerata (dactyle prairial), raygrass, éventuellement, brome, Holcus lanatus (houlque laineuse) et Anthoxanthum odoratum (flouve odorante), ces deux dernières existant déjà dans les prairies naturelles.
Concernant les légumineuses, des tentatives sont faites (sans franc succès jusqu'à présent) avec les espèces tempérées suivantes : trèfles (blanc et violet), luzerne, lotier. Deux espèces tropicales paraissent assez intéressantes en dessous de 1 400 mètres : Desmodium intortum et Desmodium incinatum et une variété d'altitude de Leucaena leucocephala (v. salvador) (.)

Seul le kikuyu peut, malgré une installation assez lente, s'implanter par boutures et sans travail du sol (sinon sillonnage ou grattage), ceci grâce à son port rampant par stolons. Selon l'altitude et la densité de boutures, il faut 3 à 10 mois pour obtenir une couverture suffisante pour éviter l'érosion. Le couvert pâturé peut se maintenir pendant 10 ans sans envahissement par les «pestes».
Les autres espèces fourragères demandent un travail du sol plus ou moins profond, un lit de semences fin et propre, des roulages. Ces fourrages vivaces n'ont pas tous les mêmes caractéristiques et exigences vis à vis du sol, du climat et de l'animal : rendement (matière sèche à l'hectare), valeur alimentaire, facilité d'implantation, besoins en fertilisation, sensibilité à l'acidité (besoins en amendements calcaires), résistance à l'excès d'eau, profondeur d'enracinement, résistance au surpâturage et à l'envahissement par les «pestes» et mauvaises herbes, durée de vie, etc
Les mieux adaptées et les plus fréquemment utilisées sont le kikuyu, la fétuque et le dactyle, parfois le ray-grass. La fétuque semble résister le mieux à l'hydromorphie, la luzerne et le dactyle pas du tout. C'est le dactyle qui possède l'enracinement le plus profond ; par contre, il forme en première année, des grosses touffes isolées donc peu couvrantes. Le ray-grass s'implante le plus rapidement (GILIBERT, 1981) ; le kikuyu est lent. Les plantes les plus «agressives», c'est-à-dire les plus résistantes à l'envahissement et qui colonisent le mieux le sol, sont le kikuyu et la fétuque qui ont par ailleurs une bonne longévité. Les plantes les plus sensibles à l'acidité sont évidemment le trèfle et la luzerne. De plus, elles résistent mal au pâturage et sont rapidement envahies par des adventices. De ce point de vue, ces légumineuses sont à l'opposé du kikuyu. En hiver, les graminées «tempérées» auront une production fourragère plus soutenue que le kikuyu qui faiblit et jaunit, d'autant plus que l'altitude augmente. En règle générale, c'est le kikuyu qui est le moins exigeant en fertilisation.
De l'ensemble de ces données, il ressort quelques règles générales :

- après défrichement, surtout s'il n'est pas très bien fait, il sera préférable d'implanter des espèces agressives (kikuyu, fétuque...) qui restent plusieurs années pour améliorer le sol,
- sur les pentes supérieures à 20-25 % : implanter de préférence du kikuyu par bouturage. Ne faire ni travail du sol ni semis. L'intérêt du kikuyu est autant son rôle de protection que sa valeur alimentaire. Celle-ci n'est pas négligeable mais elle est difficilement améliorable avec d'autres espèces sur pentes fortes qu'on ne peut fertiliser et amender correctement faute de mécanisation possible.
- Travail du sol et amélioration de la fertilité en l'absence d'hydromorphie

Les préoccupations essentielles seront :

- après défrichement ou régénération, de ne pas exposer le sol à l'action agressive des pluies,
- de favoriser une bonne exploitation racinaire du sol,
- de relever le statut nutritionnel du sol et d'en réduire l'acidité,
- de favoriser la nutrition azotée en activant la microflore et la méso-faune.

Concernant le kikuyu, on préconise dans les systèmes fourragers des hauts, de lui consacrer 75 % de la superficie totale (sur une exploitation de 10 à 30 hectares), car c'est l'espèce qui produit le plus de matière sèche. Il n'exige pas de travail du sol. Il faudra donc lui réserver en priorité les pentes fortes (plus de 25 %) les plus sensibles à l'érosion. Un sillonnage suivi d'un bouturage et d'une fermeture manuels des sillons sont suffisants. Les amendements et fertilisants sont alors apportés dans les sillons ou en couverture (photo A.35). Sur ces pentes, la mécanisation étant difficile, l'exploitation de la prairie se fera surtout en pâturage direct, peu intensif, afin d'éviter surcharge et tassement excessif du sol pouvant entrainer une dégradation trop rapide et une érosion par reptation superficielle. Concernant l'implantation des espèces «tempérées», les exigences sont supérieures. Un travail du sol est nécessaire. A la Réunion, la succession la plus courante est la suivante :

- épandage d'amendements calcaires (1 à 3 t/ha de Ca0),
- disquage au pulvériseur («crabe») ou griffage au «tiller» (10 à 15 cm de profondeur) en 2 passages croisés,
- affinage au cultivateur à dents (canadien, vibroculteur, tiller),
- roulage au cultipacker,

- semis à la volée + engrais NPK (300 à 400 kg de 10-20-20),
- nouveau roulage,
- azote en couverture (30 à 60 unités) régulièrement en cours d'exploitation.

L'implantation des prairies se fait par l'intermédiaire des Associations foncières pastorales (AFPA.3), «autorisées» à recevoir des subventions pour les amendements, engrais, travaux, clôtures...
Les périodes d'installation des prairies seront de préférence le début de la saison peu pluvieuse (mars à mai). La réserve du sol, les pluies et précipitations occultes de cette saison fraîche suffisent en général. Ainsi, à l'arrivée de la saison des pluies (novembre), le sol peut être suffisamment couvert. Suivant les espèces fourragères, la prairie peut alors être exploitée durant 3 à 6 années, soit en pâturage (le plus courant actuellement), soit en fauche (auge ou ensilage).
Un des problèmes les plus importants pour l'entretien des prairies est l'envahissement par les «pestes» et adventices - surtout Sporobolus (marie éreintée), joncs, bringellier, galabert, ajonc, rumex, cyperus, chiendent qu'il faut contrôler par des gyrobroyages ou herbicides.
Les prairies à espèces tempérées doivent donc être mécanisables (pour leur mise en place et leur exploitation). On devra les installer de préférence sur les terrains à pentes inférieures à 25 %. Au dessus de 25 %, le disquage lourd et les façons superficielles, ne pourront se faire que dans le sens de la pente avec un tracteur à chenilles. Il ne faudra les réaliser que dans les conditions les plus favorables, en début de saison sèche. Il y aura de toute façon toujours des risques de mauvaise levée et de couverture insuffisante donc d'érosion par les pluies du début de la saison suivante.
Le CEEMAT (A.3)-CIRAD (A.3) teste depuis 1986 différentes méthodes et matériels de travail du sol et de semis afin :

- d'améliorer l'emprise racinaire des prairies. Celle-ci est en effet insuffisante par l'emploi actuel des pulvériseurs à disques et «tillers» qui ne travaillent le sol que sur 10/15 cm et trop irrégulièrement,
- d'assurer une germination correcte et régulière. Cette germination se fait souvent mal à cause des débris végétaux, souches et pierres ou du lit de semences soufflé ou du dessèchement.
- Pour le travail du sol proprement dit, ont été comparés :
  - le labour à la charrue à soc (20 cm après retassement),
  - le pulvériseur lourd forestier à disques indépendants («crabe») (15 cm),
  - le décompacteur léger à 3 corps, à ailettes («actisol») (15 cm),
  - le décompacteur à dents inclinées et volet orientable («paraplow») (30 cm),
  - le chisel 7 dents (25 cm),
  - le tiller (cultivateur à dents rigides escamotables) (12 cm).

Le labour s'avère trop difficile à cause de la très forte adhésivité de la terre. Le «crabe» travaille trop irrégulièrement du fait de ses disques indépendants qui remontent dès qu'il y a un changement de dureté. L'avantage de l'actisol est qu'il pertube peu le sol en surface et qu'un seul passage suffit en général. On peut l'associer, à l'arrière, à un rouleau émietteur ce qui suffit comme travail d'affinage et de roulage. Sa profondeur de travail est cependant assez faible. Le paraplow a le grand avantage de bien fissurer le sol en profondeur et de ne pas modifier la surface (seulement de légers bombements). Un passage de vibroculteur est nécessaire ensuite. Le chisel, quant à lui, demande une très grande puissance (130 CV) et 2 passages. Le tiller, enfin est trop irrégulier et superficiel.
Donc en définitive, les décompacteurs légers du type «actisol» ou «paraplow», équipés ou non de rouleau-cage émietteur, paraissent satisfaisants. Leur inconvénient est qu'ils ne permettent pas l'enfouissement en profondeur des amendements et fertilisants qu'il faudra donc mettre en couverture. Quelle que soit la méthode, un affinage et un roulage postérieur - en équipement complémentaire ou séparément - semblent indispensables avant le semis.
Toutes les opérations, y compris le semis et son roulage final, doivent se faire le plus précocement possible en saison «sèche» et pendant un temps court, afin d'éviter un dessèchement du lit de semences. Le travail profond au paraplow à 3 corps demandera une puissance de traction de 100 à 120 CV (supérieure avec un rouleau-cage) qui ne pourra évoluer dans le sens perpendiculaire à la pente qu'en dessous de 20-25 %

et à condition que le sol ne soit pas détrempé. Pour valoriser et pérenniser la structuration acquise en profondeur, il faut semer des espèces à enracinement profond par exemple le dactyle.

- Concernant les semis

La méthode classique est le semis à la volée avec un épandeur centrifuge ou pendulaire. Il s'avère assez mal adapté pour les semis de prairies : il demande des densités trop élevées de semences dont la levée est hétérogène et aléatoire (nécessité d'une pluie peu après, ce qui n'est le plus souvent pas le cas). Le CEEMAT (A.3) recommande donc des semoirs en lignes ou en vrac avec recouvrement des graines par la terre.

D'autre part, les semis, devant la plupart du temps se faire en tout début de saison fraîche, nécessitent d'être réalisés rapidement pour éviter le dessèchement. On préconise donc pour gagner du temps, l'emploi d'un semoir combiné avec rouleau cultipacker, assurant en un seul passage semis, puis roulage assurant l'enfouissement (le matériel «ROLLOSEM» paraît satisfaisant).

Ce qui est important dans les sols de ces zones est de bien rouler avant et après le semis sur terre non desséchée et soufflée ; en final les graines doivent être enfouies à 2-3 cm et en contact étroit avec une terre restant humide suffisamment longtemps pour permettre une germination et une levée correctes. Le semoir en lignes ne peut être efficace que si le sol est très bien préparé et suffisamment rappuyé et la profondeur de semis bien contrôlée. Plusieurs passages de cultipacker sont souvent nécessaires, ce qui allonge les temps de travaux.

De tels semis mécanisés avec leurs travaux d'affinage et de roulage présentent toujours des dangers en cas de fortes averses. Pour minimiser les risques, il faut :

- opérer en saison «sèche»,
- travailler sur les pentes faibles,
- laisser des bandes enherbées, embroussaillées ou en andains tous les 20 à 30 mètres, disposées en courbes de niveau.

- Installation des prairies en zones perhumides mal drainées

Les andosols perhydratés à pentes faibles (moins de 5 %) des régions les plus arrosées des hauts de l'est , du nord-est et du centre de l'île, s'ils reposent sur une dalle plus ou moins continue, présentent un drainage interne et externe - très déficient. L'eau peut alors stagner longtemps en surface, alimentée par de multiples mouillères. Cette contrainte se retrouve aussi - et peut-être davantage - pour les andosols perhydratés sur cendres de la Fournaise, spécialement dans la Plaine des Palmistes et la Plaine des Cafres, à topographie générale sub-horizontale (voir plus loin).

L'engorgement total fait que le matériel ne peut rentrer sur le champ et que l'exploitation de la prairie est très difficile ; d'autre part le bétail tasse le terrain et dégrade rapidement la prairie qui est envahie de joncs, Rumex et cyperacées (Cyperus rotondus (oumine), Killinga sp (jambelon).

Donc l'implantation des prairies exige un minimum d'assainissement préalable dans la partie supérieure du sol.

Le drainage artificiel en profondeur ne s'avère pas possible, l'eau ne s'écoulant pas latéralement dans les andosols perhydratés.

Dans ces conditions, le CEEMAT (A.3) (PAILLAT, 1990) a expérimenté avec des résultats positifs la méthode suivante : on laboure en adossant (avec dérayures latérales), de façon à créer des planches d'environ 20 mètres de large séparées par des sillons d'évacuation de l'eau. Dans un premier temps, la planche est confectionnée en adossant systématiquement au centre y créant ainsi un bourrelet. Ensuite, on reprend au pulvériseur à disques, toujours en remontant la terre vers le centre de la planche. Pour «convexiser» la planche, on répète le labour en adossant cette fois à un mètre de chaque côté du centre ; puis nouveau passage de pulvériseur adossant vers le centre. Un dernier labour est adossé à 3 mètres du centre et suivi par une dernière reprise au pulvériseur en adossant toujours jusqu'au centre de la planche. Une fois les planches terminées, les dénivellations entre leurs centres et les sillons sont de l'ordre de 30 cm. Les eaux de pluies pourront s'évacuer.

On procède ensuite au semis et au roulage.

Tous ces travaux doivent se réaliser pendant la saison la moins pluvieuse, avec les engins les moins lourds possibles pour minimiser leur enfoncement.

La prairie est soustraite à l'engorgement total et à l'asphyxie dans sa zone d'enracinement (15 à 20 cm).

Evidemment le système ne fonctionne bien que si on assure l'évacuation de l'eau hors de la parcelle par des exutoires régulièrement entretenus.

Cette unité de milieu intéresse essentiellement les altitudes comprises entre 1 600 et 1 800 mètres sur le panneau occidental. La majeure partie est donc localisée dans la zone «domaniale» (gérée par l'ONFA.3). Elle y coïncide assez bien avec la forêt mésotherme naturelle endémique à «tamarins des Hauts» à (Acacia heterophylla) associés aux fourrés de (Nastus borbonicus (bambous-«calumets»). Quelques lambeaux de «mascareignite» peu épaisse non cartographiés sont également éparpillés dans les hauts de la Plaine des Cafres ; ils sont souvent associés à des reliques de tamarinaie dans les prairies.

Les andosols perhydratés podzoliques à «mascareignite» (unité 36)

Morphologie des sols

Les sols à «mascareignite» se reconnaissent très facilement à leur couche supérieure très claire, blanc-rosâtre, d'aspect cendreux, très friable (état humide) ou pulvérulente (état sec).

La succession des horizons est la suivante (photo A.33)

En surface sur 2 à 6 cm : litière noir rougeâtre à brun rouille foncé, à base de feuilles non décomposées de tamarins et de fougères, de structure fibreuse.

Sous la litière, sur 5 à 8 cm d'épaisseur : horizon très humifère noirâtre de type «mor», formé exclusivement de débris organiques (racines) mai décomposés et d'un entrelac de racines vivantes.

De 5/12 à 15/40 cm de profondeur : horizon de 10 à 40 cm d'épaisseur, très clair, gris-blanchâtre (10 YR 6/1) à l'état sec, à rosâtre (5 YR 5/2 à 7/2) à l'état humide. A la Réunion, ce matériau d'aspect cendreux est appelé «mascareignite» (LACROIX, 1936). Il est extrêmement léger, très friable à l'état humide, très pulvérulent à l'état sec. D'aspect continu (sans structure), il est très poreux (pores fins) et de texture limoneuse. La mascareignite est très peu colonisée par les racines, qui ne la traversent que pour exploiter les horizons sous-jacents. Comme nous le verrons, ce matériau est une accumulation de phytolithes siliceux (opale) d'origine exclusivement végétale.

Sous la mascareignite, sur une épaisseur régulière de 5 à 10 cm : bande brun foncé (7,5 YR 3/3) à brun-rougeâtre foncé (5 YR 4/1 à 6/1), apparemment à accumulation de matière organique humiliée (acides fulviques), très liée à la matière minérale. Toucher limoneux à limonoargileux. Le passage à l'horizon inférieur est diffus.

Sous l'horizon sombre, sur 8 à 15 cm d'épaisseur : «bande-horizon» brun rougeâtre à brun-rouille (5YR 3/4), apparemment enrichie en oxyhydroxydes de fer (horizon humo-ferrugineux). Toucher limoneux à limonoargileux. Le passage à l'horizon sous-jacent est très diffus.

En dessous, horizon brun chocolat à brun jaunâtre (10 YR 4/3), sur 40 à 80 cm d'épaisseur. Cet horizon, limonoargileux continu, a les caractères «classiques» des andosols perhydratés déjà décrits. Les racines de tamarins y sont nombreuses.

En profondeur à partir de 60/120 cm, le matériau, qui s'éclaircit légèrement, devient brun jaunâtre (10 YR 7/4 à 7/6) ; il présente toujours des caractères andiques marqués : toucher limono-argileux, structure continue, thixotropie fréquente, grande richesse en eau... Des bandes rouille et d'autres, plus sombres, à piégeages préférentiels d'oxy-hydroxydes de fer ou de fulvates, apparaissent fréquemment au sein de ce matériau. Des liserés ferrugineux orangés durcis renforcent certaines discontinuités entre les lits de pyroclastites. Le litage d'origine, dû aux dépôts cendreux successifs, crée des interfaces qui bloquent ou piègent de façon différentielle les migrations de ces éléments.

A une profondeur variable (60 à 300 cm) se trouve assez fréquemment un niveau de «tuf jaune» d'origine phréato-magmatique, de 20 à 60 cm d'épaisseur, peu altéré, dont nous avons souvent parlé dans les cendres du

Piton des Neiges.

Sous la mascareignite, les «horizons», à l'oeil, se distinguent essentiellement par leurs teintes : brun jaunâtre, brun chocolat, rouille, brun foncé, crème (tuf), brun grisâtre ; chaque tranche de couleur possède 10 à 50 cm d'épaisseur. Ces teintes renforcent le litage des pyroclastites, à l'intérieur desquelles les altérations, les néoformations minéralogiques et les processus de «migration - lessivage - accumulation» sont orientés. Les autres caractères morphologiques (consistance, toucher, structure, thixotropie...) sont comparables d'un horizon à un autre, sauf quand les dépôts successifs de pyroclastites sont à l'origine très différents (granulométrie, compactage...), auquel cas la pédogenèse maintient aussi des différences physiques. La structure est toujours continue, la texture est limono-argileuse, la porosité est peu apparente, la consistance est friable, peu plastique, la densité est faible, l'humidité est élevée ; la thixotropie (test du couteau) se manifeste souvent, mais plutôt en profondeur. Ce sont les caractères des andosols perhydratés.

Caractères analytiques

Les profils des sols à mascareignite apparaissent comme les plus différenciés (contrastés) de la Réunion, à cause de l'horizon supérieur cendreux, très clair, et à cause des bandes colorées dans le matériau pyroclastique proprement dit, qui signalent des processus de migration différentielle de la matière organique et du fer, ces processus étant plus ou moins facilités et orientés par le litage originel des dépôts avec leurs discontinuités d'interfaces. Ainsi, dans les pyroclastites du Piton des Neiges, plus on monte en altitude, plus ces différenciations sont nettes. Ce sont probablement des processus de migration après acido-complexolyse et «chélatation» du fer, de l'alumine et des acides fulviques, qui caractérisent la podzolisation. L'horizon supérieur gris de mascareignite est trompeur. En effet, de loin, il fait penser immédiatement à un horizon A2 «cendreux» de podzol «classique» des régions tempérées fraîches. Pourtant, ce n'est pas le cas. Il s'agit d'une concentration quasiment pure de phytolithes d'opale par «remontée biologique», d'origine strictement végétale. Contrairement aux «A2» des «vrais podzols», ce matériau ne dérive donc pas de processus pédogénétiques développés au sein du substrat pyroclastique d'origine. Cependant, malgré sa formation récente très particulière, par combustion d'une ancienne «avoune» (voir plus loin), la mascareignite est le siège du lessivage et de la migration d'acides organiques de la litière de formation actuelle qui la recouvre. Elle est également une source de silice susceptible d'alimenter le matériau sous-jacent.

- La litière, à base de débris de tamarins, fougères et Philippia, est très fortement acide. Son pH (eau) est compris entre 3,8 et 4,3.

- Dans la mascareignite, le pH est également très acide : 4 à 4,5 pour le pHeau, 3,2 à 4,0 pour le pH-KCI. Le taux de matière organique y est de l'ordre de 2 à 5 %, nettement plus faible que dans les horizons du dessous sur pyroclastites. Cet horizon est très pauvre en fer et en aluminium ZEBROWSKI (1975) cite moins de 0,5 % de Fe_2O_3 et moins de 0,25 % de Al_2O_3. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est évidemment très élevé (50 à 180). La capacité d'échange cationique est extrêmement faible (1,5 à 3 mé/100 g). L'aluminium échangeable a une teneur comprise entre 0,3 et 1,2 mé/100 g, très inférieure à celle de l'horizon immédiatement dessous. Concernant le phosphore, ce matériau en est le plus dépourvu : 100 à 500 ppm de phosphore total, 1 à 20 ppm de phosphore assimilable. La mascareignite possède donc une fertilité très faible.

- Sous la mascareignite (dans les pyroclastites)

La «bande-horizon» plus sombre (et peu épaisse) supérieure

Ce qui la différencie le mieux des horizons sous-jacents est son taux très élevé d'aluminium échangeable, compris entre 3 et 10 mé/100 g et son pH particulièrement bas (pH-eau = 4,2 à 4,4 ; pH-KCI = 3,3 à 3,5). A ce niveau, l'«acidité d'échange» (AI+++ + H+) est donc extrêmement élevée (6 à 17.mé). Le taux de matière organique est élevé (10 à 20 %), mais pas sensiblement plus qu'en dessous, malgré sa teinte plus sombre. Le rapport C/N est compris entre 15 et 20. Les proportions d'acides fulviques y sont très importantes (ZEBROWSKI, 1975) (AF/AH est supérieur à 2).

Concernant les teneurs totales (analyses «triacides») en Al_2O_3 et Fe_2O_3, ZEBROWSKI cite des valeurs faibles: 1,8 à 4 % (pour 100 g de sol séché à 105 ° C) pour Al_2O_3 (contre 20 à 30 % en dessous). Cet aluminium paraît

être exclusivement sous forme amorphe. L'entraînement de l'aluminium est donc particulièrement élevé dans ces sols. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 serait de l'ordre de 1. Concernant le fer total, il semble qu'il y ait aussi un appauvrissement (2,8 % Fe_2O_3) dans cet horizon. Autrement dit, la teinte plus sombre par rapport au dessous serait davantage due à un départ de fer qu'à une richesse plus élevée en carbone total.

La bande-horizon plus rougeâtre (et peu épaisse) sous-jacente

Son pH est encore très acide (pH-eau de l'ordre de 4,5 et pH-KCI de l'ordre de 3,9). Le taux de matière organique, toujours très élevé (15 à 20 %), présente un C/N de 15 à 20 comme dans l'horizon supérieur avec une forte prédominance des acides fulviques sur les acides humiques.

Le taux d'aluminium échangeable est toujours très élevé (1 à 5 mé/100 g). «L'acidité d'échange» (AI+++ + H+) est donc très forte (2,5 à 9 mé). Concernant les éléments totaux, cet horizon, comme le précédent, est encore appauvri en Al_2O_3 ; par contre, il est nettement enrichi en Fe_2O_3 (20 à 23 % dont 70 % est en «amorphe») par rapport à ce même horizon du dessus. Il est également un peu plus riche en fer qu'en dessous (17 à 20 %). Cela suffit à expliquer sa coloration plus vive. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est alors relativement élevé (comparé aux perhydratés «classiques»), de l'ordre de 0,8 (ZEBROWSKI, 1975). Pour le phosphore, cet horizon (ainsi que le précédent) présente des quantités plus faibles (1 000 à 1 800 ppm de P205 total, 5 à 20 ppm de P_20_5 assimilable) qu'en profondeur. Cela signifie que le phosphore est fortement lié à l'aluminium et qu'il migre en même temps que lui.

L'horizon brun jaunâtre à brun chocolat plus profond (Jusque vers 80 à110 cm de profondeur)

Le pH remonte légèrement (pH-eau, compris entre 4,6 et 5,0 ; pH-KCI compris entre 4,8 et 5,1). Le pH est proche de zéro. Le taux d'aluminium échangeable est généralement compris entre 2 mé (au sommet) et 0,5 mé (en profondeur), correspondant à une acidité d'échange de 1,7 à 4,3 mé. Le taux de matière organique est toujours très élevé (6 à 15 %), sans qu'elle induise une coloration particulièrement sombre de l'horizon. Le rapport C/N est élevé (18 à 25). Il s'agit essentiellement d'acides fulviques facilement mobilisables. On note encore des départs très sensibles de fer et d'alumine dans ce matériau bien que nettement inférieurs à ceux des horizons supérieurs. En effet ZEBROWSKI (1975) a dosé environ 17 % de Fe_2O_3 et 25 % de Al_2O_3. Or dans les horizons B d'andosols perhydratés «classiques» (non podzoliques) ces valeurs sont nettement plus élevées (30 - 35 % pour le fer et 30-40 % pour l'alumine). Ce sont les valeurs vers lesquelles on doit progressivement tendre seulement en profondeur (en dessous de 110 cm) dans les andosols podzoliques. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est ici de l'ordre de 0,8, alors que dans les andosols perhydratés non podzoliques, il était de 0,2 à 0,4 (tab. 6.6). Donc, en plus du départ de l'aluminium, il y a probablement «recharge» corrélative en silice à partir de la dissolution d'une partie de la mascareignite supérieure (qui était une remontée biologique précédente).

En profondeur (au-delà de 110 cm), le taux de matière organique diminue très progressivement tout en restant élevé (encore 5 à 8 % à 150 cm de profondeur). Le rapport C/N est de l'ordre de 15 à 20. Le pH est un plus élevé qu'au-dessus : pH-eau = 4,8 à 5,1 et pH-KCI = 4,9 à 5,3. Le pH est donc négatif (-0,1 à -0,3). Le taux d'aluminium échangeable est compris entre 0,3 et 0,6 mé/100 g. L'acidité d'échange (AI+++ + H+) est comprise entre 1,3 et 2,5 mé/100 g. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 descend progressivement de 0,8 à 0,4. De la même façon, il est intéressant de constater qu'à partir de 100/120 cm, le taux de phosphore total, tout en restant élevé, commence à décroître (2 500 ppm vers 100 cm, 1 500 ppm vers 200 cm). Le phosphore semble donc bien lié à l'aluminium, et le suit dans sa dynamique verticale.

L'origine de la mascareignite

Les particules d'opale (silice amorphe) en forme de baguettes plus ou moins hérissées, de 20 à 100 μ de large, ont pour origine essentielle les concrétions intra-cellulaires siliceuses (phytolithes) libérées et accumulées sur place après départ de la matière organique. On y trouve aussi des enveloppes sporales ainsi que des frustules de protozoaires d'eau douce (flagellés) et de diatomées.

La couche de mascareignite a une épaisseur comprise entre 10 et 40 cm. Sous végétation naturelle à tamarins (Acacia heterophylla), bambous «calumets» (Nastus borbonicus) et fougères, elle est recouverte par une litière dont l'ensemble dépasse rarement 20 cm. Il ne s'agit pas de la véritable «avoune» spongieuse, celle-ci ayant

plus de 50 cm d'épaisseur (jusqu'à 2 mètres) et n'étant présente que dans les «Hauts» humides (voir plus loin).

Si les phytolithes sont connus dans certains sols acides podzoliques, une telle accumulation à l'état pur n'a jamais été décrite ailleurs qu'à la Réunion. Les questions qui se posent sont donc les suivantes :

- Quel type de végétation a pu donner une litière originelle si riche en silice ?
- Quelle épaisseur de litière a pu donner, après minéralisation de la matière organique, une telle épaisseur de mascareignite ?
- Par quel processus les phytolithes ont-ils été libérés et concentrés sur place, autrement dit comment la matière organique a-t-elle été évacuée sans résidus ?

On ne peut essayer de répondre à ces questions qu'en comparant des situations actuelles, en combinant des indices d'ordre «phyto-pédoécologique» et en envisageant l'évolution du milieu sur l'ensemble des Hauts de la Réunion.

Il faut constater d'abord qu'il n'y a jamais de stade intermédiaire entre une épaisse litière-«mère» du type «avoune» et la mascareignite ; celle-ci est toujours présente à l'état «pur», sans débris organiques résiduels. Cela signifie que l'élimination de la matière organique dont elle dérive a été un processus rapide (comparé aux processus pédogénétiques) et total. Celuici, à notre avis, ne peut être que la combustion interne suivie d'un lessivage par les pluies des cendres résiduelles autres que les phytolithes d'opale et frustules de diatomées, ces dernières étant restées en place sans modifications importantes de leurs structures.

- On en conclut que la combustion ne s'est pas faite à très hautes températures ; l'avoune originelle devait donc être riche en eau. Cela expliquerait aussi l'absence, sous la mascareignite, de signes de combustion du sol sous-jacent lui-même, qui, sinon, à plus haute température, aurait pu «écobuer» et rougir sur une épaisseur sensible, compte tenu de sa richesse en matière organique (8 à 15 %). Or, on n'en voit pas de trace.

Une épaisse «avoune», litière acide d'aspect tourbeux, de 0,5 à 2 mètres d'épaisseur, existe actuellement (voir plus loin) sur certaines planèzes recouvertes de pyroclastites du Piton des Neiges, en altitude et en situation bien arrosée sans saison marquée (Bébour-Bélouve, Plaine des Chicots, Plaine des Fougères, Plaine de Lianes, Ilet Patience, Pentes du Côteau Maigre). Par contre, dans ces mêmes situations, on ne trouve pas de mascareignite. Nous avons vu, en suivant T. CADET (Chap.4), que la forêt mésotherme d'altitude, qui couvre ces zones, s'était développée probablement et progressivement à la suite d'une végétation (pionnière) dense à base de grands Philippia (bruyères arborescentes) abritant un épais matelas de mousses, sphaignes et fougères... C'est la longue accumulation de ces débris végétaux qui aurait donné une telle épaisse litière spongieuse. Les zones à avoune actuelle sont d'ailleurs encore riches en gros Philippia multiséculaires à matelas épais de bryophites.

Les cendres du Massif de la Fournaise ne montrent ni véritable «avoune» (épaisse) ni «mascareignite». Or ces cendres sont récentes (moins de 10.000 ans, et le plus souvent moins de 5 000 ans), alors que celles du Piton des Neiges ont plus de 15 000 ans. Il faudrait donc au moins 10 000 ans pour accumuler plus de 1 mètre d'avoune sous bruyères suivis par les «bois de couleur» de la série mésotherme.

Pour revenir à la mascareignite, si on considère une épaisseur moyenne de 20 cm, composée quasi exclusivement de silice, il nous paraît nécessaire qu'elle dérive d'une litière de plus de 1 mètre d'épaisseur, comparable à l'avoune qui existe dans les zones dont nous venons de parler.

Rappelons que les mascareignites les plus épaisses et spatialement les plus continues sont localisées entre 1 600 et 1 800 mètres d'altitude, sur le panneau occidental le plus «sec» de l'île avec 4 mois «secs» (moins de 50 mm de pluie), zone qui est donc la plus sensible aux incendies. Or ZEBROWSKI (1975) cite une datation d'un débris carbonisé au sein de la mascareignite, donnant environ 1 300 ans. Si cette datation est fiable et même si elle est insuffisante pour l'extrapolation à l'ensemble de la mascareignite, on peut en conclure que cette mascareignite dérive d'incendies bien antérieurs aux premières incursions de l'homme dans l'île (il y a moins de 500 ans). Ces incendies auraient donc été causés par la foudre en années particulièrement sèches, donc sur une végétation prédisposée. La plus propice paraît être un fourré dense à base de Philippia géants (riches en essences particulièrement inflammables). L'avoune épaisse qui s'y était formée pendant les millénaires précédents

(10 000 à 15 000 ans ?) a entretenu ces incendies sous la végétation et subi une combustion totale, qui a pu couver et se propager pendant longtemps, à température modérée compte tenu de sa richesse en eau.

Mais alors, pourquoi cette végétation et son matelas organique n'ont-ils pas brûlé plus tôt ? Nous pensons que les conditions climatiques n'étaient pas réunies. Tout comme elles ne le sont pas pour les régions à avoune épaisse du Piton des Neiges actuellement exposées «au vent», trop arrosées. Il est possible qu'il y ait eu dans la région ouest un léger changement de régime des pluies aboutissant au contraste actuel. Le climat autrefois plus uniformément humide, d'une part aurait permis une forte accumulation d'avoune, d'autre part aurait empêché la propagation d'incendies. En effet, à l'heure actuelle, dans le centre-est, très arrosé, les incendies peuvent se déclarer mais, étouffés par l'humidité, ils ne durent pas suffisamment pour que brûle l'avoune. Alors que, historiquement, les années sèches ont souvent vu les hauts de l'ouest s'embraser dans les zones à bruyère et à tamarins, la combustion étant entretenue pendant des mois dans la litière (de moins de 30 cm pourtant). L'année 1988 en est un bon exemple.

- Relations Philippia/tamarins/avoune/mascareignite

Partout où il y a de la mascareignite, il y a généralement un peuplement de «tamarins» (Acacia heterophylla) au-dessus. L'inverse n'est pas vrai, puisque l'aire d'extension des tamarins est supérieure à celle de la mascareignite. Cependant, on constate que c'est sur ce matériau que les peuplements de tamarins sont les plus «purs» sans toutefois être les plus gros. Par ailleurs, on sait que les graines de tamarins ne peuvent germer qu'en situation ensoleillée. Cette espèce ne peut se régénérer qu'en clairière ou sous ombrage «clair», là où il n'y a pas de concurrence avec les espèces à épaisses frondaisons. Il paraît donc probable que Acacia heterophylla ait été le plus compétitif pour coloniser rapidement les aires à avoune brûlée évoluant en mascareignite des Hauts de l'Ouest ensoleillés ; en effet, cette espèce semble particulièrement adaptée aux sols très acides (pH 4 à 4,5) qui en ont résulté. Les autres «bois de couleur» de la forêt mésotherme, à «humus doux», ont une croissance moins rapide et préfèrent les sols moins acides, à podzolisation peu marquée.

L'écologie naturelle la plus favorable au tamarin est la base de l'étage oligotherme à Philippia. Au-dessus il fait trop froid, en dessous la «forêt complexe à bois de couleur» (T. CADET) avec ses épiphytes et bryophytes, l'étouffe. Ces situations favorables existent à la Fournaise entre 1 500 et 1850 mètres d'altitude sur lapilli (revers du Rempart de Bellecombe, Hauts de La Crête...). En dessous de la frange 1 500-1 850 mètres, le tamarin peut exister seulement à l'état dispersé où il exploite les clairières occasionnelles pour évoluer en gros et vieux arbres, au sein des autres espèces qui ne permettent plus sa régénération naturelle. Son évolution est donc la disparition. C'est le cas de Belouve et de la Plaine des Chicots en dessous de 1 500 m où, manifestement, les tamarins, n'existant qu'en gros individus, sont progressivement étouffés par les «bois de couleur».

En conditions humides «normales» (sans incendies dus à un assèchement climatique), entre 1 500 et 1 850 mètres, la succession dynamique temporelle de la végétation haute sur pyroclastites serait donc très schématiquement la suivante :

1. Fourré dense à grands Philippia.
2. Forêt à Acacia hefierophylla.
3. Forêt complexe mésotherme (bois de couleur).

Avec le temps, Acacia heterophylla empiète vers le haut sur le fourré dense à Philippia. Il ne prend sa place que jusque vers 1 800-1 900 mètres ; audelà, il est limité par la température. La forêt complexe, à son tour, mord à partir du bas sur la forêt à tamarins jusqu'à 1 500-1 600 mètres. A chaque étage est associé un sous-bois spécifique, très riche en mousses et sphaignes pour les Philippia, en fougères et Philippia pour les tamarins, en fougères, bryophytes, épiphytes, lichens pour la forêt complexe. Ces sousbois participent fortement à l'accumulation de la litière. Ce sont les litières sous Philippia puis sous tamarins qui seront les plus épaisses, les plus acides et les plus riches en phytolithes siliceux.

En résumé, l'hypothèse émise est donc la suivante : dans l'ouest un assèchement climatique (saison sèche plus longue) a permis l'incendie par la foudre de l'aire à Philippia avec son avoune sous-jacente ; celle-ci a donné

un résidus cendreux siliceux, rapidement colonisé par les tamarins dont les graines ont pu germer aisément ; lessivé par les pluies, ce résidu a évolué en mascareignite. Les forêts de tamarins de l'Ouest ont ainsi dû brûler à plusieurs reprises. Cela expliquerait, d'une part la moindre fréquence qu'ailleurs de vieux et gros individus, d'autre part la faible épaisseur (moins de 25 cm) de la litière actuelle et enfin la présence de nombreux fourrés associés de bambous-«calumets» (Nastus borbonicus) réputés, par leurs souches résistantes, résister aux feux (T. CADET, 1980) et donc enrichir peu à peu les aires d'incendies.

La pédogenèse

Les sols à «mascareignite» apparaissent donc comme des sols complexes qui présentent des caractères d'andosols perhydratés et des caractères de podzolisation surimposés.

Le matériau originel est constitué des mêmes pyroclastites que celles qui ont donné naissance aux andosols décrits dans les pages précédentes. Rappelons qu'elles sont constituées de projections litées essentiellement cendreuses composées de verre de nature trachytique alcaline sodique intégrant de nombreux produits basaltiques cristallisés de ramonage. Des passées tuffeuses soudées plus compactes, de genèse phréatomagmatique, s'y intercalent, en particulier le fameux «tuf jaune» que l'on trouve fréquemment entre 1 et 3 mètres de profondeur. Chimiquement, ces cendres sont riches en silice. La composition chimique initiale des verres, inobservable actuellement du fait de leur hydrolyse avancée, peut être estimée ainsi: 60 % SiO_2,16 % Al_2O_3, 7 % Fe_2O_3 + FeO, 1 % MgO, 3,5 CaO, 6 % Na_2O, 3 % K_2O. L'incorporation dans ces verres de nombreux grains basaltiques (à olivine) provenant du raclage des conduits modifie la composition du matériau parental qui, globalement, devait être un peu moins riche en silice (50 à 55 %?) et plus riche en fer (10 à 12 %?). Ces «sables» basaltiques constituent actuellement la fraction la moins altérée des cendres.

Rappelons enfin que les dernières pyroclastites du Piton des Neiges sont datées d'environ 15 000 ans, la base pouvant être estimée à 30 000/40 000 ans. leur épaisseur moyenne est comprise entre 1 et 3 mètres.

Entre 1 500/1 600 mètres et 1 800/1 900 mètres d'altitude, sur les planèzes ouest de l'île, où se trouvent les sols à mascareignite, le climat actuel est caractérisé par 1 600 mm de pluies annuelles, une saison «sèche» (moins de 100 mm mensuels) de 4 mois, atténuée par de nombreux brouillards, des températures moyennes mensuelles comprises éntre 10 ˚ C en août et 16 ˚ C en janvier. La moyenne des minima approche 5 ˚ C en août (1,5 ˚ C pour les minima absolus) et 11 ˚ C en janvier (7,5 pour les minima absolus).

Il n'est pas exclu, comme nous venons de le voir au sujet de la genèse de la mascareignite, qu'il y ait eu depuis les 5 derniers millénaires, une modification du régime des pluies. La mascareignite pourrait en effet dériver d'une «avoune» (litière semi-tourbeuse) de plus de 1 m d'épaisseur, à base de débris de Philippia, mousses et sphaignes, accumulés (pendant 10 000 ans?) sous un climat «perhumide» (sans saison sèche) du type existant actuellement dans la région «au vent» de l'île. Seul en effet le climat actuel paraît pouvoir expliquer la mise à feu par la foudre des épais fourrés à gros Philippia, prolongée par la propagation de ce feu dans l'avoune aboutissant à sa combustion totale pour ne laisser que ce résidus de phytolithes siliceux.

Beaucoup mieux que les fosses fraîchement creusées, les multiples tranchées de routes et autres coupes montrent que le litage naturel des dépôts pyroclastiques est renforcé ou surimposé par des colorations diverses, orientées dans le même sens (horizontal), mais d'origine pédogénétique. Une telle différenciation, alors qu'elle s'ébauche à plus basse altitude, dans la zone des andosols perhydratés «classiques», est particulièrement marquée au-dessus de 1 500 mètres, dans le domaine de la mascareignite.

Ces sols sont donc le siège de processus de dissolution, de migration et de piégeage différentiels des éléments tels que la silice, le fer, l'aluminium et les acides organiques, auquels il convient d'ajouter le phosphore, élément réputé peu soluble mais qui peut être mobilisé grâce à ses affinités privilégiées avec l'aluminium. Les acides organiques, particulièrement les «acides fuiviques» (à petites molécules) mobiles et riches en charges anioniques, sont les agents essentiels de migration dans les eaux de gravité, du fer et de l'aluminium adsorbés sous des formes amorphes en «complexes organo-minéraux» («chélates») stables et solubles. Des variations locales du pH et du Eh, en liaison avec l'augmentation de la vitesse de circulation des eaux de drainage au sein de certains niveaux pyroclastiques (plus perméables et plus grossiers) peuvent provoquer la précipitation des hydroxydes métalliques amorphes adsorbés et leur séparation partielle d'avec leurs supports organiques, dont une

partie continue à migrer. C'est alors l'état du fer (chélaté ou ferrique libéré) et sa teneur totale qui expliquent surtout les variations colorées dans le profil. En fonction des conditions des microsites, les chélates libèrent ainsi partiellement et de façon sélective les hydroxydes métalliques qui s'accumulent en bandes (soit étroites et concentrées, soit larges et diffuses) que l'on appelle les horizons «spodiques».

Les processus de chélatation/migration/piégeage des hydroxydes et de la matière organique soluble issue de la litière très acide supérieure (mor) caractérisent un système dynamique complexe où interviennent des rétroactions ; ils font probablement intervenir au moins deux types d'acides fulvo-humiques : les uns, relativement polymérisés et à mobilité réduite (à molécules assez grosses), les autres à petites molécules (aliphatiques, peu polymérisées) solubles et très mobiles. Ce sont ces derniers qui mobilisent le fer et l'alumine et qui descendent le plus facilement pour former des horizons spodiques dans le matériau pyroclastique andique dont une caractéristique essentielle de ce point de vue est qu'il est extrêmement filtrant. Les chélates d'acides fulviques peu polymérisés noircissent peu le profil alors que les acides fulviques plus polymérisés et les acides humiques assombrissent les bandes où ils se condensent et s'accumulent sans que cela reflète une teneur plus élevée en matière organique. Ces 2 fractions organiques peuvent se transformer l'une en l'autre suivant l'ambiance physico-chimique et l'action catalytique du fer adsorbé, qui, au-delà d'une certaine quantité, favorise la polymérisation et donc l'insolubilisation des acides fulviques.

Il y a donc dans ces sols deux ensembles fondamentaux de processus d'altération :

- l'hydrolyse quasi totale des verres des cendres trachytiques, avec évacuation de la silice solubilisée et genèse de minéraux alumino-silicatés para-cristallins (allophanes, imogolite) et d'oxy-hydroxydes amorphes. C'est l'«andosolisation»;
- l'acido-complexolyse des amorphes métalliques (et para-cristallins ?) à partir d'une litière très acide (agressive et à faible activité microbienne), avec formation de chélates qui mobilisent le fer et l'alumine. C'est la podzolisation. Il vaut mieux parler de «crypto-podzolisation» dans la mesure où, à l'inverse des podzols classiques, ici, les horizons spodiques ne sont pas toujours bien manifestes à l'oeil et qu'il n'existe pas de vrai horizon «A2» dégradé et lessivé. Ces processus podzolisants se surimposent dans un matériau allophanique perhydraté.

Il faut maintenant nous interroger sur la diachronie de ces processus, dont on sait que, l'un comme l'autre (particulièrement la podzolisation), peuvent être très rapides sur des matériaux aussi filtrants

- le rôle des polyphasages et héritages en relation avec la mascareignite, la probable «avoune» préexistante avec la végétation originelle qui lui a donné naissance et qui maintenant n'existe plus ;

- le rôle actuel du manteau siliceux de mascareignite, d'une part sur l'entretien ou l'accélération de la podzolisation à partir de la modeste litière actuelle, d'autre part sur la «recharge» en silice du matériau sous-jacent. Concernant la dernière question, les analyses «triacide» (ZEBROWSKI, 1975) sur sol total séché à 105 ° C, nous indiquent, sous la mascareignite, des rapports SiO_2/Al_2O_3 de l'ordre de 1, qui paraissent anormalement élevés comparés à ce qu'on mesure (0,2 à 0,4) dans les matériaux andiques perhydratés aluminiques situés en dessous de 1 500/1 600 mètres d'altitude. Ce rapport diminue progressivement en profondeur (environ 0,7 à 1 mètre) ; vers 1 m 50, on se rapproche probablement de 0,4. Ce gradient pourrait provenir autant, sinon plus, d'un enrichissement en silice à partir de la dissolution des phytolithes d'opale de la mascareignite, que de l'appauvrissement en alumine dans la partie supérieure du profil (mais sous la mascareignite).

Il est difficile d'établir si les «bandes-horizons» superposées, l'une brun très foncé supérieure, l'autre brun rougeâtre inférieure plus riche en fer, qui sont situées systématiquement juste sous ta mascareignite (que l'on pourrait appeler Bh et BFe), résultent de la podzolisation opérée à partir de la production d'acides organiques issus de la petite litière actuelle à tamarins, ou bien s'il s'agit d'un héritage de ce qui se passait sous l'avoune préexistante. Il est certain que cette dernière, si elle était à base de Philippia, comme probable, devait être beaucoup plus épaisse et agressive que l'actuelle. En effet, ailleurs dans l'île, les bandes, lisérés ferrugineux et niveaux «placiques», sont toujours dominés par des litières à Philippia à pH extrêmement acides (de l'ordre de 3,5). La végétation à tamarins avec sa litière paraît donc davantage entretenir la podzolisation qu'en être la

cause initiale fondamentale. Celle-ci reviendrait à l'avoune préexistante sous Philippia (brûlée il y a 1 000 à 5 000 ans ?).

D'autres incertitudes subsistent concernant ces sols, en particulier le rôle du polyphasage des retombées successives des pyroclastites dans l'explication des autres bandes, rougeâtres et sombres, situées en profondeur : s'agit-il d'une polypodzolisation fractionnée dans le temps à partir de niveaux organiques chélatés enterrés successifs, ou bien d'une podzolisation fractionnée verticalement à partir d'une litière sommitale unique ?

La durée importante du dépôt des cendres (20 000 ans) rend vraisemblables des accalmies avec l'installation de Philippia acidifiants et plaiderait donc en faveur de la 1 re hypothèse. Cependant, même sans interruption volcanique, les différences physiques (granulométrie, perméabilité) ou chimiques (fer) des lits cendreux, induisant des vitesses de circulation d'eau différentes, pourraient suffire à expliquer les échelonnements verticaux d'horizons spodiques. L'extrême perméabilité d'ensemble des cendres, la solubilité des complexes fulviques, l'absence de microflore minéralisante et contrariante sont autant de facteurs favorisant une telle «chromatographie» profonde et fractionnée.

On connaît également peu de choses sur la nature réelle et l'état de cristallisation des constituants minéraux sous la mascareignite. ZEBROWSKI (1975) avait montré que, jusqu'à au moins 1 mètre de profondeur, le fer, la silice et l'aluminium étaient en quasi-totalité sous une forme amorphe (extraction par attaques successives HCI-8N, NaOH-0,5 N). Il n'y aurait donc pas de gibbsite ni de goethite cristallisées. On peut supposer la présence en grande quantité d'hydroxydes d'aluminium amorphes et de ferrihydrite. Dans la partie supérieure podzolisée, on ne sait pas encore quels sont l'abondance, l'état et la répartition des aluminosilicates para-cristallins (protoimogolite, imogolite, allophanes...). Comment se passe l'interaction entre la genèse de ces constituants et leur dégradation ou inhibition par l'action corrosive des acides organiques solubles ? Que devient le retour de silice en provenance de la mascareignite, est-elle libre ou combinée ?

Cela pose le problème général du passage, sur un même matériau, de l'andosolisation à la podzolisation. Ici, le problème se complique du fait de la formation de la mascareignite : énorme soutirage biologique de silice vers le haut, suivi d'une recharge par lessivage.

Contraintes agronomiques

La plus grande partie des sols à mascareignite appartient au «Domaine» géré par l'ONFA.3 et ne devrait donc pas être cultivée. Ils sont couverts, pour la plupart, d'une tamarinaie. Quelques «langues» et poches de mascareignite existent cependant en dessous de la Ligne Domaniale, entre 1 500 et 1 700 mètres ; elles sont occupées par des forêts de tamarins, des boisements d'Acacia decurrens (vieilles jachères de géranium) et quelques prairies.

Les sols à mascareignite présentent des contraintes importantes

- d'abord chimiques : acidité excessive (pH = 4 à 4,5), aucune réserve minérale entre 10 et 20/40 cm de profondeur, forte teneur en aluminium échangeable (toxique) en dessous ;

- puis physiques et hydriques : extrême érodibilité du matériau pulvérulent, finement limoneux, non structuré (photo A.34) ;

- enfin, biologiques : faible teneur en matière organique et absence d'activité biologique, inhibant fortement la minéralisation de l'azote.

L'horizon de mascareignite est un matériau quasiment inerte proche de la stérilité. Seule la couche exclusivement organique supérieure (moins de 15 cm, le plus souvent 10) correspondant à une litière à Acacia peut concentrer quelques éléments minéraux par remontée biologique. Seuls les végétaux à fort enracinement ont des chances de se développer correctement ; il faut en effet que leurs racines s'enfoncent dans le vrai substrat d'origine minérale. Encore faut-il qu'ils soient bien adaptés aux sols très acides et résistants à l'aluminium échangeable.

En conséquence, seules des prairies à espèces peu exigeantes, telles le kikuyu (Pennisetum clandestinum) sont susceptibles de valoriser quelque peu ces sols. Si l'on veut une production correcte il faudra enfouir des doses

importantes d'amendements calcaires, de phosphore et de matière organique humifiée. Si la mascareignite possède moins de 30 cm d'épaisseur et si le substrat minéral est à moins de 40 cm de profondeur (ce qui est quand même le cas général), il faudra pratiquer un soussolage/décompactage profond et croisé de façon à briser la discontinuité entre les 2 matériaux pour favoriser le passage des racines. Ensuite, par un labour profond, on essayera de remonter la terre pour l'incorporer à la mascareignite en même temps que les amendements. Après affinage, on pourra alors bouturer le kikuyu. Sur pente, la charge bovine à l'hectare ne devra pas être trop importante. La nature limoneuse et l'absence de structure du sol est propice aux processus de glissement/décollement superficiel et de tassement, qui dégraderont rapidement la prairie.

Les andosols perhydratés à «avoune» (unités 37 à 39)

Le terme vernaculaire «avoune» (ou «voune»?), peut-être d'origine malgache, désigne à la Réunion, sous la végétation naturelle des Hauts de l'île, le niveau de matière organique brute, humide, lâche et spongieux, formé de l'accumulation de débris végétaux.

Nous restreindrons ce terme aux couches épaisses de plus de 50 cm, qui caractérisent certaines zones spécifiques. L'avoune la plus typique fait plus de 1 mètre d'épaisseur. On la rencontre surtout en aval de la «Plaine» des Salazes, dans les «Plaines» de Bebour et Belouve, dans l'extrême nord de la Plaine des Cafres. A l'état très discontinu, elle est également présente dans la «Plaine» des Chicots, la «Plaine» d'Affouches, la «Plaine» des Fougères, l'îlet Patience. On n'en voit pas dans le massif de la Fournaise.

L'avoune ne commence pas avant 1 400/1 500 mètres d'altitude et peut s'étendre jusqu'à 1 900 mètres. Mais, c'est vers 1 600-1 800 mètres qu'elle paraît la mieux formée. La pluviométrie est supérieure à 2 000 mm ; il n'y a pas de saison sèche. La température moyenne annuelle est comprise entre 12 et 14 ° C.

Elle repose sur des cendres du Piton des Neiges à caractères andiques perhydratés, surimposés par des marques de podzolisation, visibles surtout par des bandes orangées ferrugineuses au sommet.

Dans sa partie supérieure, le manteau d'avoune est constitué d'un enchevêtrement de vieux troncs couchés et branches pourries où prospèrent en abondance des bryophytes (mousses, hépatiques, sphaignes) et des épiphytes, dont de nombreuses fougères. En dessous, la matière organique brute se tasse et se fragmente en se décomposant très lentement en milieu gorgé d'eau ; s'y mêle un entrelacs dense de racines vivantes. Il s'agit d'un (hydro)mor semi-tourbeux.

- La végétation productrice d'avoune

Actuellement l'avoune s'observe le plus souvent sous végétation forestière mésotherme riche en «bois de couleur» (Aphloia, Nuxia, Weinmannia, Monimia...) quand s'y mêlent de gros et vieux Philippia (P. montana) en quantité variable mais pouvant devenir dominants au-dessus de 1 600 mètres.

L'avoune présente un C/N compris entre 30 et 40. Son pH est très fortement acide (3,5 à 4). Nous pensons, comme T. CADET (1980), qu'il y a un décalage entre la végétation à base de «bois de couleur» (mélangés aux Philippia), qui existe actuellement sur l'avoune, et la végétation qui a vraiment donné naissance à cette dernière.

En fait, la forêt mésotherme d'altitude, dans la majorité des sites, ne prospère pas sur une couche d'avoune. Elle libère le plus souvent un «humus» doux modérément acidifiant dans une couche organique peu épaisse (moins de 40 cm) sous laquelle on ne voit pas, dans l'andosol, d'horizons orangés, signes habituels d'une mobilisation du fer par les acides organiques. Or, de tels horizons ferrugineux, présents sous avoune, ne se voient pas ailleurs que sous litière à base d'éricacées.

L'hypothèse est donc qu'une telle accumulation d'avoune aussi acidifiante ne peut provenir que d'une végétation à base de Philippia et briophytes pendant une durée très longue, après la fin du dépôt des cendres il y a environ 15 000 ans. La végétation mésotherme de «bois de couleur» ne se serait installée, progressivement, que par la suite, étouffant peu à peu les Philippia dont les vieux individus subsistent.

Il existe, nous l'avons vu, un lien génétique entre l'avoune et la mascareignite. Dans les Hauts de l'Ouest, celle-ci dérive sans doute de la combustion de la première, suite probablement à un léger assèchement climatique de ce côté de l'île.

Les caractères podzoliques de l'andosol situé sous l'avoune sont comparables à ceux des sols à mascareignite.

6.6 Les coulées de la phase VI (unités 40 à 43)

Du point de vue géologique, il s'agit des dernières émissions effusives du Piton des Neiges (direction N.E.) dont l'âge est estimé à 10 000-12 000 ans.

Elles s'étendent en amont de Saint André (rive gauche de la Rivière du Mât) et en amont de Bras Panon-Saint Benoît (rive gauche de la Rivière des Marsouins. Le premier ensemble, le seul ayant atteint la mer, venait de l'intérieur de la deuxième caldera ouverte au niveau de la Rivière du Mât actuelle. Le 2e ensemble a emprunté d'anciennes vallées de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins (Takamaka), qui ont continué à s'entailler par la suite.

Ces coulées visqueuses de faible étendue (4 000 hectares actuels) sont venues recouvrir le manteau pyroclastique de la phase V. En effet le placage cendreux supérieur, lorsqu'il existe, est ici très discontinu (poches) et peu épais (moins de 50 cm). En aval, les coulées se sont étalées en partie sur de vieux cônes de déjection (actuellement en début de ferrallitisation), issus de la Rivière du Mât et de la Rivière des Marsouins.

Les coulées de la phase VI, de teinte claire, sont de nature benmoréitique (trachy-andésites alcalines) essentiellement à faciès autobréchifié (unités 40, 41 et 42). La petite coulée, située au débouché de la Rivière des Roches (unité 43), d'aspect ignimbritique, est massive à structure «flammée».

6.6.1 Les coulées auto-bréchifiées de Saint André

Le principal ensemble, situé sur la rive gauche de la Rivière du Mât (photo A.57), occupe 2 500 hectares : Commune Bègue, Menciol, Bras des Chevrettes, Plateau Sarabé, Bras-Pistolet, Mare à Songes, La Découverte, Le Plate (Cap Picard). La canne à sucre monte jusqu'à environ 600 mètres d'altitude. Au-dessus, existe un fourré secondaire à base de goyaviers et Jam-Rosats passant, à partir de 1 000 mètres, aux Bois de couleur. Toute cette région contraste par rapport aux sols profonds sur cendres ou altérites ferrallitiques («terres franches») qui commencent au N-W de la Petite Rivière Saint-Jean. Ici les «gratons» des coulées affleurent en de très nombreux endroits et les sols sont caillouteux. L'altération est peu poussée, et d'autant moins que l'on monte en altitude. A partir de 800 mètres (au niveau du Plate), elle se réduit à une simple désagrégation des gratons.

Le modelé

Les pentes générales sont faibles (10 % en moyenne). Cependant, il y a de nombreux ressauts dus aux bossellements et bourrelets longitudinaux bordant les coulées. Ces bourrelets sont particulièrement repérables en amont de Bras-Pistolet, au-dessus de 600 mètres d'altitude. En dessous de 300 mètres (Bras des Chevrettes), les coulées se sont étalées avec des pentes inférieures à 5 %.

Toutes ces laves ont nappé un relief préexistant découpé en ravines, incisant les mugéarites de la phase IV. Certaines vallées profondes n'ont pas été totalement ennoyées ; des langues de coulées récentes ont scellé leurs fonds sans recouvrir les berges. C'est le cas de la Ravine Sèche.

L'épaisseur des coulées est très irrégulière, moins de 10 mètres en général; des «fenêtres» de pyroclastites (phase V) non recouvertes peuvent subsister. Sous les laves récentes les sols sur cendres, fossilisés, présentent une rubéfaction due à la cuisson. De telles «boutonnières» à cendres cuites sous faible nappe de recouvrement

s'observent bien autour de la Chapelle Notre Dame des Hauts, où le profil topographique montre une rupture de pente du modelé antérieur.

Les sols

L'altération météorique hydrolytique est très peu avancée sur ces roches. Elle n'est sensible que jusque vers 300 mètres d'altitude, où, à titre comparatif, elle est du même ordre que sur les basaltes de la Fournaise d'environ 10 000 ans, situés autour de la Confiance-Sainte Anne (aval de la Plaine des Palmistes), à altitude comparable (voir Chap. 7, unité 54 page 303).

Sous pluviométrie élevée (3 000 à 4 000 mm annuels) sans mois «sec» (moins de 50 mm), cette altération jeune donne des sols «bruns andiques acides» non perhydratés, désaturés, progressant irrégulièrement entre les éléments anguleux de la lave auto-bréchifiée à faciès en «gratons». La matrice «argileuse» brun jaunâtre, englobe une grande proportion d'éléments grossiers (graviers, cailloutis et blocs) inaltérés.

Les cailloutis sont souvent revêtus d'imprégnations jaunâtres dues à la libération du fer (goethite mal cristallisée). La profondeur utile du sol, très irrégulière, est limitée à 20/60 cm selon les endroits. Le taux de matière organique est de 3 à 5 % (C/N = 10 à 12). En surface, le pH-eau est de l'ordre de 5 (pH-NaF = 9 à 9,3) et le complexe adsorbant, dont la capacité d'échange (au même pH) est faible (environ 3 à 5 mé/100 g), est désaturé. En dessous de 20 cm, le pH est compris entre 4,5 et 5. Le taux de matière organique est d'environ 1,2 %. Le pH bas et la désaturation peuvent paraître étonnants pour des altérations jeunes. Il faut y voir l'action hyperlixiviante du climat perhumide. Il ne faut pas oublier que nous sommes ici sur des roches volcaniques du pôle «acide», riches en silice et pauvres en minéraux basiques calco-ferro-magnésiens.

Aucune analyse poussée, particulièrement minéralogique et chimique (éléments totaux), n'a encore été effectuée sur ces sols jeunes issus directement des coulées en région perhumide chaude (sans que des cendres plus récentes perturbent leurs interprétations). On peut s'attendre à y trouver, à côté d'une grande quantité de minéraux primaires (plagioclases, pyroxènes...) et de débris microlithiques et vitreux, des minéraux secondaires à base d'halloysite, d'allophanes siliceuses, de gibbsite et de goethite.

Les seuls éléments «objectifs» nous permettant pour l'instant de dire que ces sols ont des caractères andiques, sont, dans l'horizon B, le fait que le test «au NaF» soit positif et que le pH-eau soit inférieur au pH-KCl (pH = - 0,8 à 1,2).

En montant en altitude (à partir de 300 mètres), les sols se chargent de plus en plus en blocs scoriacés (gratons) en même temps que la pente augmente et que le modelé de détail devient plus irrégulier (ressauts, bossellements). Les coulées affleurent souvent directement.

L'épaisseur du sol dépasse alors rarement 40 cm et il est très sensible à l'érosion.

A partir de 600 mètres d'altitude, dans la zone occupée par des taillis de goyaviers, des Philippia et des clairières de prairies, apparaissent quelques placages de cendres de moins de 40 cm d'épaisseur dans les zones plates et les creux (unités 40 et 41). Ces cendres correspondent aux derniers soubresauts explosifs du Piton des Neiges. A ces endroits, les sols sont des andosols désaturés perhydratés (teinte brun foncé à brun jaunâtre). Sous ce recouvrement cendreux, les gratons de benmoréite présentent un enduit altéritique noirâtre «gras» et humide, qui pourrait être riche en produits amorphes.

Contraintes agronomiques

Mécanisation et épierrage

En canne à sucre, la mécanisation intégrale (jusqu'à la récolte) n'est possible que sur les terres parfaitement épierrées, à pentes générales inférieures à 12 Jusqu'à 300 mètres d'altitude, ces conditions sont réunies sur une grande partie du «plateau» de Menciol-Bras des Chevrettes. A partir de 300 mètres et jusqu'à 600 mètres, limite

actuelle de la culture de la canne, la mécanisation lourde est beaucoup plus difficile car la pente générale, même si elle n'est pas excessive, est coupée de nombreux bossellements blocailleux (affleurements de «gratons») à pentes locales fortes. D'autre part, c'est un des domaines de la culture de la vanille en intercalaire de canne. La vanille grimpe sur des tuteurs vivants de «bois de chandelle» (Dracaena reflexa) ; actuellement, sur ces parcelles, toute mécanisation est donc exclue.

C'est l'occasion ici de parler des techniques et travaux préalables à la mécanisation des terres caillouteuses.

La mécanisation de la récolte exige des terres ne possédant pas en surface d'éléments grossiers d'une taille supérieure à 5 cm. A l'état «vierge», le sol est souvent encombré, en surface et en profondeur, d'éléments de toutes tailles, des blocs aux cailloutis. L'épierrage se fait en plusieurs étapes :

- La première phase consiste, avec un bull équipé à l'avant d'un râteau «Fléco», à pousser les blocs supérieurs à 30 cm et à les rassembler en andains.
- Ensuite, le chenillard, équipé à l'arrière de 3 grosses dents sous-soleuses (rippers) espacées de 1 mètre, extirpe les gros blocs juqu'à environ 50 cm de profondeur. Ces blocs sont alors ratissés au «fléco» et poussés vers les andains (photo A.23). On repasse les rippers de façon croisée ou en parallèle. A la fin, les éléments de plus de 50 cm de large sont donc éliminés.
- Dans un deuxième stade, avant d'opérer l'épierrage fin, on opère 2 passages croisés de chisel (écartement des dents d'environ 50/70 cm). En conditions favorables (sol ressuyé et absence de «caps» rocheux), cela permet d'éliminer les cailloux supérieurs à 30 cm sur 30 cm de profondeur. Ces éléments sont ensuite ratissés et andainés au «Rockland», râteau poussé au bull, comprenant 18 dents, qui balaie en surface tout ce qui dépasse 15 cm.
- L'épierrage fin : traditionnellement il n'était pas réalisé sous la surface du sol ; les opérations se limitaient aux passages de «rockland». L'inconvénient majeur était que chaque travail du sol, y compris le passage de la sillonneuse avant replantation, remontait régulièrement des cailloux qui gênaient la mécanisation. L'épierrage n'était jamais terminé. Depuis quelques années, afin d'augmenter les surfaces mécanisables, le CEEMAT (A.3) a adapté une épierreuse «kverneland» robuste, qui fait un travail satisfaisant jusqu'à 10 à 15 cm de profondeur. Portée à l'avant d'un tracteur lourd, elle est composée d'une lame en acier de 1,65 m de large, qui racle sur 10-15 cm de profondeur, terre et cailloux. A l'arrière se trouve une rampe élévatrice de 50 cm de large à crible vibrant, par laquelle la terre retombe au sol. Les cailloux supérieurs à 5 cm, tombent dans une remorque tirée en parallèle.
  Un tel épierrage fin ne peut se faire sur des pentes supérieures à 12 %, pas trop morcelées et sans trop de chicots rocheux. Les terrains comme ceux de Menciol à sols d'épaisseur irrégulière, dont le substrat rocheux (dalle ou gratons) peut remonter à moins de 20 cm de la surface posent des problèmes pour les chisels non équipés de dents qui s'effacent.
  Il est nécessaire de choisir des conditions climatiques optima surtout sur la côte au vent (août-septembre en général). En effet, le sol doit être suffisamment ressuyé pour ne pas coller aux pierres et pouvoir retomber au sol par la trémie.
  Un autre aspect sur lequel il faut être vigilant est l'extrême érodibilité du sol après de tels traitements agressifs. Une terre nue ameublie et privée de son squelette caillouteux est prête à partir. Il faudra donc assurer très rapidement une couverture. Or, celle-ci ne peut l'être par la canne vierge qu'au bout de 3 à 4 mois. Il est alors conseillé, sitôt l'épierrage réalisé, d'épandre des écumes. Le sillonnage et la plantation se feront en courbes de niveau, à travers cette couche protectrice.
- Postérieurement à l'épierrage fin, les passages des divers engins de mécanisation provoquent un tassement sensible de la couche épierrée, qui peut se réduire à moins de 10 cm d'épaisseur. Le sol ne peut plus être travaillé profondément. Lors du dessolage, l'emploi des disques lourds (crop master) oblige alors à refaire un épierrage. Une solution à ce problème pourrait être le «labour chimique» avec désherbage total et sillonnageplantation entre les anciennes souches.

Fertilité

Les sols des Hauts de Saint-André apparaissent légèrement plus acides que les terres franches voisines. Ils présentent aussi un complexe adsorbant très pauvre et désaturé. Le chaulage est ici indispensable ; compte tenu

du pouvoir tampon de ces sols, supérieur à celui des ferrallitiques, des doses de 5 à 7 tonnes/hectare de $CaCO_3$ nous paraissent nécessaires, l'objectif étant d'approcher un pH de l'ordre de 5,5. Les engrais azotés devront être fractionnés du fait du climat très pluvieux. Il faut éviter son apport sous forme de sulfate d'ammoniaque (acidifiant) ou d'ammonitrate (trop soluble). Préférer l'urée. Les réserves en phosphore sont assez importantes, mais elles sont peu assimilables. Des apports de 300 unités de P205 à la plantation devraient être suffisants pour 6 repousses, à condition que le chaulage soit simultané, sinon on risque la rétrogradation.

Les besoins en potasse sont importants sous ce climat lixiviant. En culture intensive, on préconise 300 à 400 unités de K_2O (fractionnées) par pousse.

Autres cultures

A côté de la canne à sucre, sont envisageables dans cette zone :

- L'arboriculture fruitière : agrumes, litchis, bananiers, papayers. Ces fruitiers s'accommodent très bien des sols caillouteux non compacts. Une contrainte importante est cependant le risque cyclonique, cette région étant non protégée des vents.
- Les cultures maraîchères : favorisées par la proximité de Saint-Denis, ces cultures sont possibles en dehors des jardins familiaux réservés à l'autoconsommation ; cependant, les conditions climatiques (humidité, ensoleillement) sont moins favorables que dans l'Ouest et le Sud pour faire de l'intensif. Les problèmes de maladies et de mauvaises herbes sont accrus dans la zone au vent. Ces cultures seront étalées de préférence en saison fraîche. Pour certaines, 2 cycles sont possibles. Les sols nécessiteront une forte amélioration :
  - Concernant le pH : les cultures maraîchères demandent des sols peu acides (pH $>$ 5,5). Le chaulage à fortes doses sera indispensable.
  - Concernant la pierrosité : la petite mécanisation (motoculteur), nécessaire en maraîchage semi-intensif ou intensif, exigera un épierrage fin parfait sur au moins 20 cm. Dans de telles conditions, les risques d'érosion sont particulièrement importants. En maraîchage, on ne devrait cultiver que des pentes inférieures à 5 %, protégées si possible par une «couverture morte» (mulch). La zone la plus intéressante est donc située en dessous de 300 mètres d'altitude.
  - Concernant la matière organique : les apports de fumier, d'écumes ou de composts devront être importants (10 à 50 t/ha de fumier suivant la culture). L'élevage, au-dessus de 600 mètres d'altitude, s'il se développait davantage, pourrait être une source régulière de fumier. Sinon, les écumes peuvent être fournies par l'usine de Bois-Rouge.

  En l'absence d'irrigation, l'alimentation hydrique en saison fraîche ne devrait pas poser trop de problèmes. Il n'y a pas (en moyenne) dans cette région de mois à moins de 50 mm de pluie. La période «critique», certaines années, pourrait être septembre-octobre. L'ail et l'oignon déjà cultivés sur les alluvions à galets de Saint-André demandent souvent à cette époque une irrigation d'appoint, mais ces sols sableux ont une réserve hydrique plus faible que ceux de la zone du Bras des Chevrettes.
- Les prairies : du point de vue climatique, c'est surtout au-dessus de 600 mètres d'altitude (limite de la canne) que les conditions sont les plus intéressantes pour l'élevage bovin. Les contraintes sont ici la faible épaisseur des sols, leur excessive pierrosité et le climat très pluvieux. Audessus de 800 mètres d'altitude (le Petit Plate) il n'y a pratiquement plus de «soi». On rentre alors dans la forêt à «bois de couleur» qu'il faut protéger. Donc, à l'heure actuelle, seule la forêt secondaire, entre 500 et 800 mètres, peut faire place aux prairies. Il en existe déjà un certain nombre (Hauts de La Perrière, de Bras-Pistolet, de Menciol). L'installation des prairies consiste, dans un premier temps, en défrichement des taillis forestiers, souvent denses, à goyaviers et jam-rosats. Le défrichement au bull (ripper + fléco) qui déracine, dérocte et pousse l'ensemble en andains, est très perturbant pour le sol, surtout quand il est peu épais. Dans ces zones perhumides, une bonne couche de terre organique part souvent avec le reste. Le chantier est ensuite exposé à une érosion intense et rapide. L'utilisation de la débroussailleuse-broyeuse à axe horizontal derrière le tracteur n'étant pas envisageable ici compte tenu de l'abondance de blocs en surface, la seule solution alternative au bull est le défrichement manuel à la tronçonneuse. Le buli se limitera ensuite à pousser

les blocs qui dépassent et les débris végétaux pour les aligner en andains perpendiculaires à la pente. L'épierrage sous la surface ne nous paraît pas souhaitable. Après un épandage de chaux et de fertilisation de fond, on pourra réaliser 1 ou 2 passages de pulvériseur lourd à disques crénelés indépendants («crabe»), bien adapté à ces types de terrains encombrés. Un travail d'affinage au pulvériseur léger (perpendiculairement à la pente) précédera le semis ou le bouturage (pour certaines graminées). Le roulage (cultipacker) est toujours nécessaire pour les semis.

Sous ce climat, une contrainte importante au maintien des espèces fourragères est la concurrence avec les cyperacées (Cyperus rotondus, Killinga).

Les espèces fourragères qui paraissent les mieux adaptées à cette tranche d'altitude (600-800 mètres) très arrosée sont (BIGOT, 1985) :

- en graminées : Setaria sphacelata, Paspalum plicatulum, P. dilatatum.
  Ces espèces, surtout Setaria, résistent bien à l'envahissement par les cypéracées. Elles sont difficiles à utiliser en association avec des légumineuses, ces dernières étant étouffées. Secondairement pourraient convenir aussi : Hemarthria altissima, Bracharia ruziziensis, Cynodon plectostachyus (star grass), Pennisetum clandestinum (kikuyu), Pennisetum purpureum var. Kizozi (Kizozi) et le Bana grass (P. purpureum X P. typhoides).
- en légumineuses : Desmodium intortum, D. uncinatum, Stylosanthes guyanensis. Une espèce arbustive, Leucaena leucocephala paraît également intéressante. Pueraria, Centrosema et Glycine semblent trop peu agressives vis-à-vis des adventices et moins adaptées à ces sols acides. L'avantage du Stylosanthes est qu'il nodule naturellement, alors que Desmodium nécessite une inoculation de rhizobium. Il est évident que toutes ces légumineuses exigeront un chaulage important des sols.
  L'exploitation des prairies sera le pâturage (en rotation). La fauche nous paraît difficile compte tenu des difficultés. de mécanisation (relief bosselé à nombreux chicots rocheux).

6.6.2 Les coulées de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins

Ce deuxième ensemble de coulées benmoréitiques récentes du Piton des Neiges ne représente actuellement que 1 700 hectares. Après avoir dévalé des vallées encaissées, elle se sont étalées en aval (Harmonie, Abondance, Bourbier), sur un cône de déjection ancien montrant un début d'altération ferrallitique (voir plus loin, unité 80). Du fait de leur viscosité, elles n'ont pu atteindre la mer.

Deux sous-ensembles peuvent être distingués.

6.6.3 Des coulées autobréchifiées (unité 41)

Ces coulées ont emprunté la vallée encaissée de la Rivière des Marsouins (Takamaka). Elles y forment actuellement, sur sa rive gauche, une étroite «terrasse» perchée de 200 à 500 mètres, en partie recouverte de colluvions et éboulis descendus de la chaine du Piton Papangue. Les laves de ces coulées sont claires (gris clair à crème) ; elles sont fortement blocailleuses, les blocs caverneux étant imprégnés d'enduits blanchâtres de dégazage fumerollien. En amont, le départ de ces coulées est difficile à identifier (Camp de Marseille ?), compte tenu de la dissection intense postérieure qui a affecté cette zone. En aval, depuis Abondance jusqu'à Bourbier, la lave s'est répandue sur le cône alluvial à pente très faible. Toute cette partie est cultivée en canne à sucre sur des sols bruns andiques acides, peu épais et caillouteux, identiques à ceux décrits précédemment, au-dessus de Saint André.

6.6.4 Des coulées ignimbritiques (unités 43)

Descendues par des gouttières du Bassin de la Rivière des Roches, elles se sont répandues sur son cône alluvial (plateau d'Harmonie). Les lieux de sorties de ces laves «écumantes» (type nuée ardente ?) on été en grande partie démantelés par une intense érosion régressive activée par la morpho- tectonique. La partie amont du

Bassin de la Rivière des Roches, extrêmement accidentée, perhumide et forestière, est la plus inaccessible et inhospitalière de l'île. Une partie des émissions semble toutefois provenir d'une fissure orientée NNW jalonnée par un bourrelet visible sur photos aériennes qui part du Piton des Deux Mamelles. Ce bourrelet fissural semblait se prolonger au NW jusqu'au Grand Rein, dans le secteur actuellement déblayé par la dissection régressive qui empiète peu à peu sur la «Plaine» des Lianes et le «Plateau» du Mazerin. A partir de cette fissure, les nuées auraient dévalé vers la mer en empruntant les couloirs creusés dans le volcanisme ancien (phase II), séparés par les rides montagneuses du Grand Rein, du Grand Battoir et du Piton Papangue. Dans ces secteurs (inaccessibles), les restes des coulées ignimbritiques forment actuellement des plateaux morcelés et effondrés ; ils sont démantelés et souvent décalés entre eux par la morphotectonique ultérieure (du type «îlet») ; ils sont recouverts en grande partie d'éboulis.

Au niveau du plateau d'Harmonie, la seule zone cultivée (canne à sucre) de cet ensemble, la topographie est régulière (larges ondulations, pas de ressauts) ; les sols sont plus favorables que sur les coulées autobréchifiées, dans la mesure où ils sont plus épais et non caillouteux, se rapprochant des «terres franches». Ce sont des sols à horizon B brun jaune assez homogène, épais d'environ 1 mètre, reposant sur l'ignimbrite altérée plus compacte, claire, avec sa structure «flammée». Ce sont des andosols désaturés, formés sur matériau de nature trachy-andésitique riche en verre.

En surface, il y a environ 5 % de matière organique (C/N = 10). Le pH-eau est acide (environ 5) ; en profondeur, le pH est encore plus acide alors que le pH-KCI est de l'ordre de 6 (pH = -1). Le taux de matière organique est de 1 % à 1 mètre de profondeur. La capacité d'échange est extrêmement faible (moins de 1 mé/100 g).

6.7 Les nuées ponceuses de la phase VI (unité 44)

Cette unité de milieu intéresse une faible superficie (600 hectares), près de Saint Louis et de Saint Pierre, en bordures nord et sud du cône de déjection de la Rivière Saint-Etienne : usine du Gol, nord de la Ville de Saint Louis (Pont Neuf, Roche Maigre), sud et ouest de Bois d'Olive.

Ces nuées ardentes ont dévalé jusqu'en mer sur le flanc sud du Piton des Neiges à partir de fissures probablement situées à l'intérieur de l'emplacement actuel du Cirque de Cilaos. Les dépôts ont été postérieurement entaillés et déblayés en grande partie par la dynamique hydrologique balayante en chasse d'eau du Bras de Cilaos et du Bras de La Plaine, qui ont construit par la suite le vaste cône à galets de la Rivière Saint Etienne. Ces alluvions s'appuient donc en majeure partie sur un substratum formé des nuées ponceuses. Sur la rive gauche du cône de déjection, les nuées ponceuses ont été recouvertes par les nappes de basaltes fluides descendant de la Plaine des Cafres (phase IV de la Fournaise).

Au nord et au sud des alluvions à galets, les matériaux des nuées forment des «pseudo-glacis» perchés à pentes régulières sub-horizontales, secs et caillouteux, en général peu cultivés, couverts d'une maigre végétation secondaire semi-xérophile (savane herbeuse à Heteropogon, sisal...).

Les meilleures coupes dans ces matériaux s'observent dans les carrières qui bordent la route nationale et dans les falaises naturelles situées à l'ouest de Bois d'Olive. On y voit des litations grossières de produits pyroclastiques gris noirâtre, hétérogènes, soudés (plus ou moins fortement) par un ciment sablo-cendreux. Les éléments constitutifs sont riches en verre ponceux grisâtre trachy-andésitique ; mais ils comprennent des cailloux et blocs de nature diverse (basaltes, hawaïtes, mugéarites...), issus du ramonage explosif des accumulations plus anciennes du Piton des Neiges.

Les sols, sur ces formations, sont peu épais. Ils ont toujours moins de 50.cm, le plus souvent moins de 20 cm. L'horizon meuble supérieur est de teinte brune, riche en cailloux, généralement bien structuré (enracinement graminéen). Le taux de matière organique est de 1 à 5 % (C/N = 10). Le pH est de l'ordre de 6,5 à 7. La capacité d'échange est relativement élevée (environ 20 mé/100 g de terre fine). Le complexe adsorbant est saturé. Sodium et magnésium sont présents en quantité non négligeable (Na = 1 à 2 mé/100 g). C'est l'influence des embruns marins.

Le substrat (parfois appelé «tuf») est compact, infranchissable à l'eau et aux racines. Il affleure directement en de nombreux endroits.

Ces sols, peu profonds et «secs», sont donc défavorables ; ils sont peu cultivés. Seule la zone située au sud de Bois d'Olive est cultivée en canne à sucre irriguée.

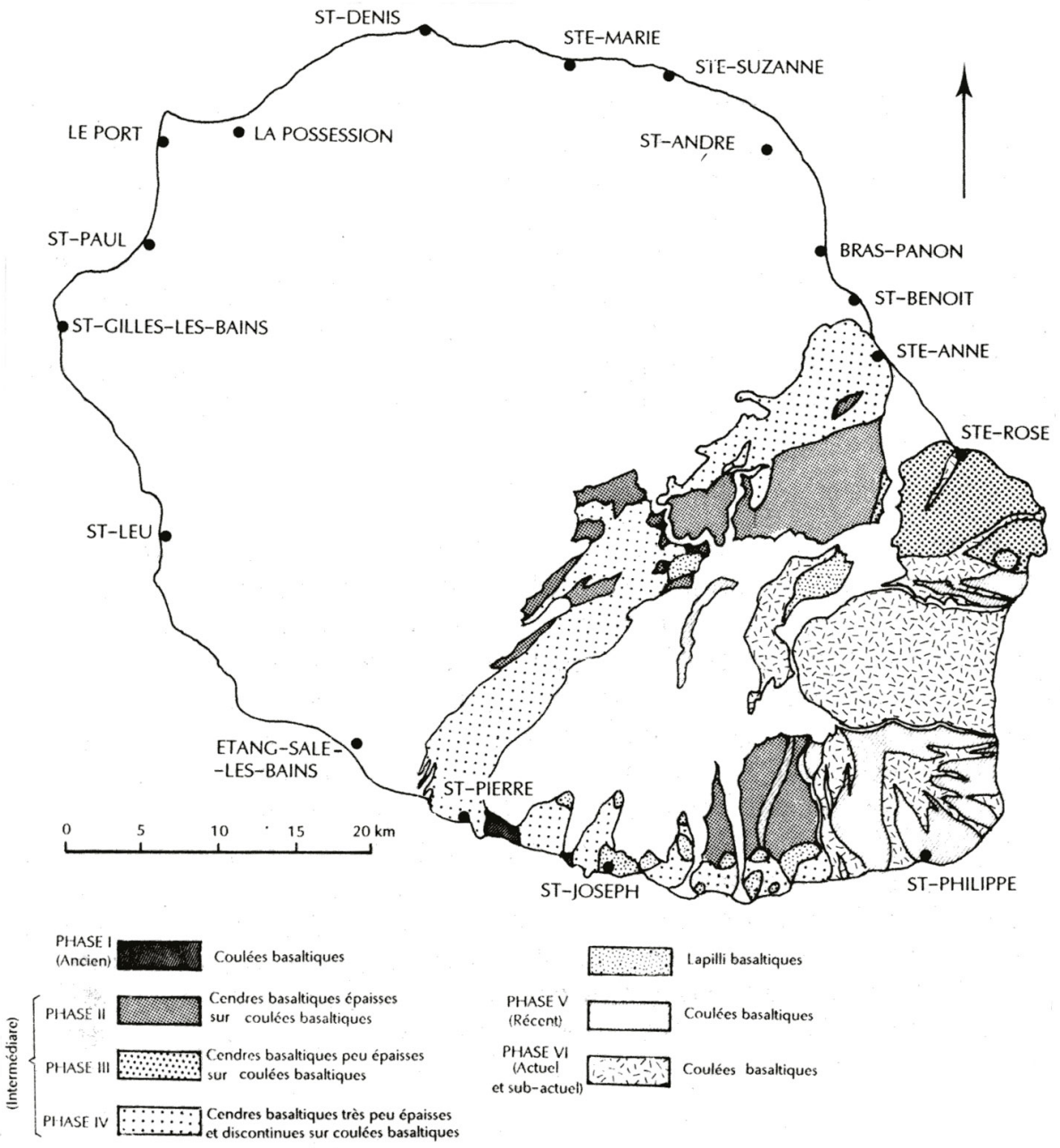
Chapitre 7

LES UNITES DE MILIEU SUR MATÉRIAUX VOLCANIQUES EN PLACE DE LA FOURNAISE (UNITES 45 A 67)

Le volcan bouclier de la Fournaise est plus simple et moins diversifié que le massif du Piton des Neiges (Fig. 2.1). Son âge est plus récent. En conséquence, les altérations hydrolytiques des coulées sont, en général, moins épaisses, voire inexistantes. D'autre part, la dissection par l'érosion régressive est beaucoup moins avancée, de sorte que le modelé reste essentiellement d'origine volcanique ou volcano-tectonique. Il y a peu de morpho-tectonique et de dissection généralisée comme au Piton des Neiges. La nature pétrographique des laves (coulées et projections) est relativement homogène. Il s'agit de basaltes à olivine. Le volume des émissions pyroclastiques est faible relativement à celui du Piton des Neiges. Les recouvrements cendreux y seront donc moins épais, laissant apparaître souvent le substrat rocheux blocailleux non ou peu altéré.

La majeure partie de la Fournaise, hormis la facade sud-ouest, est exposée «au vent» et donc très arrosée (2 000 à 9 000 mm annuels sans saison sèche). La zonation climatique liée à l'exposition est donc moins déterminante qu'au Piton des Neiges pour différencier les unités de milieu.

FIG. 7.1 – *Les «roches mères» des sols du massif de la Fournaise. (Zones de très haute altitude exclues)*



(.jpg)

Le facteur qui sera ici le plus discriminant sera en fait l'épaisseur des cendres recouvrant les coulées (Fig. 7.1). Il ne s'agit plus ici des cendres trachytiques du Piton des Neiges. Nous avons vu que celles-ci ont recouvert sur plusieurs mètres une partie du panneau sud-ouest (Notre Dame de La Paix/Bérive), composé des basaltes de la phase I de la Fournaise. Par commodité, on a donc considéré ce panneau comme faisant partie, du point de vue des matériaux superficiels et des sols, du Piton des Neiges. Nous n'en reparlerons donc plus.

Le reste de la Fournaise, édifié essentiellement après la fin des dernières phases explosives du Piton des Neiges, a été nappé par ses propres cendres, de nature basaltique cette fois. Depuis la fin de la phase II, ces phases explosives se sont suivies de façon assez rapprochée (en raisonnant à l'échelle pluri-millénaire) de sorte que plus les coulées sont anciennes, plus elles présentent un nappage cendreux épais, sans toutefois atteindre l'épaisseur de celui du Piton des Neiges.

Cette «loi» semble suffisamment vérifiée pour que nous en fassions le critère principal distinguant les «unités de milieu», caractérisées par des sols d'épaisseur et de pierrosité différentes. En effet, les coulées étant peu altérées, ce sont essentiellement les cendres qui les recouvrent qui «font» les sols (ce qui était loin d'être le cas général au Piton des Neiges). En dehors des zones de haute altitude (étudiées par ailleurs), les coulées actuelles et sub-actuelles n'en possèdent pratiquement pas.

Une telle classification est valable dans la mesure où l'érosion n'a pas tronqué ces cendres différemment selon les endroits. En effet, il nous est apparu que dans les secteurs des cendres de la Fournaise, du fait d'un climat perhumide et d'un couvert forestier efficace, l'érosion de type pelliculaire ou en nappe n'avait pas encore oeuvré de façon importante pour tronquer significativement ces cendres. L'érosion n'a eu un rôle important que dans la région de Saint Pierre en dessous de 300 mètres d'altitude sur coulées de la phase I (profondément altérées) et sur coulées de la phase IV (peu altérées). Dans ces zones à climat plus sec, l'érosion a décapé totalement les cendres ; ce sont les seuls secteurs de la Fournaise où les sols se différencient par la nature (et donc l'ancienneté) des altérations directes des coulées basaltiques. Partout ailleurs, ce sont les cendres basaltiques récentes, leur épaisseur en particulier, qui commandent la nature des sols.

7.1 Les coulées anciennes sans recouvrements cendreux (unité 45)

Les altérations brun rougeatre épaisses (ferrallitiques) du panneau sudoccidental de la Fournaise, sur basaltes anciens de la phase I (plus de 250 000 ans), n'apparaissent bien que dans le secteur où elles ont été décapées de leurs cendres du Piton des Neiges et épargnées par les coulées plus récentes, c'est-à-dire dans la zone de Saint Pierre et de Bérive, en dessous de 300 mètres d'altitude. La ville de Saint-Pierre a été bâtie en grande partie sur ces altérations. A l'ouest de cette ville, elles ont été recouvertes par des coulées de la phase IV (voir plus loin), parfois en langues très peu épaisses. Le biseau de contact se voit bien le long de la route du Tampon. Le basalte récent non altéré y recouvre l'altérite argileuse rougeâtre à résidus d'altération en boules du basalte de la phase I. A l'est de Saint-Pierre, ces vieux sols s'observent jusqu'à Cafrine, puis ils disparaissent à nouveau sous des coulées de la phase IV (Montvert) et réapparaissent à Anse-Les-Bas. La majeure partie est cultivée en canne à sucre.

Ce secteur fait encore partie de la face «sous le vent». La pluviométrie moyenne annuelle y est, d'ouest en est, de 1 000 à 1 300 mm (avec 5 mois à moins de 100 mm).

Dans cette région, la disparition des cendres du Piton des Neiges, est, comme dans les zones ouest et nord de l'île, le résultat de l'érosion naturelle. Plus que le ravinement et le décapage en nappe, c'est davantage la morphodynamique de glissement/colluvionnement au sein des altérites argileuses elles-mêmes (prédisposées) qui ont, peu à peu, entraîné et éliminé les cendres (à sols bruns andiques). Le matériau superficiel est souvent (surtout dans les creux et bas de pente) un mélange de «cendres + altérites ferrallitiques», comme dans la région de Sainte Marie/Sainte Suzanne (Fig. 6.7).

Il en résulte un modelé en pente faible régularisé en «pseudo-glacis». Les bossellements et ressauts originels des coulées ont été «digérés» par l'altération et les processus de glissement qui l'ont affectée. De gros blocs

arrondis non altérés résiduels peuvent joncher la surface.

7.1.1 - Les sols

Les coulées basaltiques de la phase I de la Fournaise présentent des altérations rappelant dans l'ouest celles des coulées d'hawaïtes de la phase III du Piton des Neiges, d'âge comparable (de l'ordre de 300 000 ans). La différence est que dans l'ouest, la pluviométrie étant inférieure et l'érosion ayant été plus active, d'une part les racines d'altération sont moins profondes, et d'autre part, la troncature des profils a été plus marquée. Ici, les sols sont donc plus épais.

Dans un cas comme dans l'autre, l'altération hydrolytique a dégagé dans les parties massives des coulées de grosses boules à desquamation en «pelures d'oignon». Autour de ces boules résiduelles à coeur intact et écailles grises ou orangé, le basalte à olivine a été digéré en une altérite grisâtre violacée jusque vers 4 à 10 mètres de profondeur. Dans les 2 mètres supérieurs, cette altérite s'est argilifiée en un sol brun-rougeâtre de type ferrallitique.

C'est cette partie supérieure qui a subi des processus d'érosion et de redistribution par glissement-fluage-colluvionnement, aboutissant à la morphologie actuelle des sols :

- en surface, sur 20 à 30 cm : le sol est brun-foncé, meuble, bien structuré (structure polyédrique fine), sans cailloux, à fort développement racinaire (canne à sucre en général).
- en dessous, sur 30 à 100 cm : la couleur est brun jaunâtre à brun rougeâtre foncé, sans taches ; la texture est très argileuse, englobant quelques cailloutis grisâtres altérés, parfois des boules peu altérées. La structure est polyédrique grossière anguleuse. La cohésion est forte. Les racines sont encore abondantes.

Ce matériau supérieur, d'épaisseur irrégulière, est le plus souvent très remanié. On y trouve des discontinuités, des lisérés de cailloutis, des boules plus ou moins altérées... Il repose en général sur la partie profonde «en place» par un plan de glissement.

- en dessous (à partir de 50/130 cm) : le matériau altéritique en place est plus clair dans son ensemble, mais les couleurs y sont très variées ; elles reflètent l'hétérogénéité de la progression de l'hydrolyse et de l'argilification. L'altération digère totalement le basalte en «gratons» (couleur grise à jaunâtre à traînées noires manganiques) et irrégulièrement les parties massives des coulées : le long de fissures qui isolent des éléments arrondis (10 à 100 cm de diamètre) à exfoliation concentrique. De part et d'autre de ces fissures, où l'eau circule bien, l'altération s'argilifie et se rubéfie le plus rapidement. Ce sont les zones meubles de l'altérite où les racines peuvent encore pénétrer.

- en profondeur (à partir de 3 mètres), le matériau altéritique est uniformément massif, de teinte gris violacé. Les structures hexagonales le long des fissures et la desquamation autour des boules sont bien dessinées, mais il n'y a pas encore de langues d'argilification.

Les caractères analytiques de ces sols sont les suivants :

- Le taux de matière organique est de 3 à 5 % dans l'horizon supérieur (C/N = 10 à 12) où le pH est d'environ 6,2.
- En dessous (horizon «B»), le pH est de 5,6 à 6. Le complexe absorbant a une capacité d'échange faible (7 à 10 mé/100 g). Il est saturé à 80-90 % (3 à 4 mé Ca, 3 à 4 mé Mg, 1 mé Na). Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est compris entre 1,7 et 2,0.

Ce sont des sols ferrallitiques faiblement désaturés, remaniés. Leurs minéraux argileux sont l'halloysite, la métahalloysite et la goethite (GENSE, 1976).

7.1.2 - Conséquences agronomiques

Ces «terres franches» ferrallitiques sont assez comparables à celles de la région du littoral nord, de Sainte Marie-Sainte Suzanne (cf. unité 17). Elles sont cultivées en canne à sucre irriguée sur des exploitations de 3 à 15 hectares. Le modelé est très favorable à la mécanisation, les pentes étant généralement inférieures à 10 %. La récolte mécanisée est pourtant encore peu répandue.

Les problèmes qui peuvent se poser sont :

- l'acidification des sols : le chaulage sera nécessaire en dessous de pH 5,5,
- le compactage progressif en cas de mécanisation totale.

Cette région est apte à toute diversification (arboriculture, maraîchage, élevage). L'irrigation est assurée à partir du Bras de La Plaine (SAPHIRA.3).

7.2 Les matelassages de cendres épais (unités 46, 47 et 48) Localisation

Mis à part la couverture cendreuse (à «tuf jaune») de 2 à 3 m, issue du Piton des Neiges qui couvre une partie de ses versants SW (phase I et partie phase II), la Fournaise comporte aussi un matelas cendreux provenant exclusivement de sa propre dynamique éruptive et accumulé sur les coulées de sa phase II, lorsque ces dernières n'ont pas été nappées de coulées plus récentes.

L'épaisseur de ces cendres basaltiques est de 1 à 2 mètres. On les trouve principalement dans 4 situations :

- sur les grands versants nord, entre la Rivière de l'Est et la Plaine des Palmistes (Piton Armand-Les-Hauts) : c'est l'ensemble le plus important. Il commence en aval, à 150 m d'altitude sur la rive droite de la Ravine du Petit Saint Pierre (Cambourg-La Boucherie) et monte jusqu'à environ 1 600 mètres. Ce domaine est cultivé en canne à sucre sur les zones à pentes douces jusqu'à environ 450 mètres d'altitude. Puis, sur pentes fortes, il passe à la forêt : d'abord fourrés secondaires denses à goyaviers et jamrosats, ensuite forêt mégatherme jusqu'à 1 000 mètres, puis forêt mésotherme, pour s'arrêter au secteur des «branles» de haute altitude.
- En aval et au nord, ces coulées de phase II sont limitées par les coulées de phase IV qui les ont recouvertes en descendant de la Plaine des Palmistes;
- en amont de la Plaine des Palmistes, dans les secteurs sud : à GrandFond et Fond de Bras Piton, entre 1 000 et 1 500 mètres d'altitude (limite ici de la zone domaniale). Dans cette région, les cendres sont mélangées à des niveaux de lapilli rougeâtre dus à la proximité de quelques édifices explosifs.
  Ici, les coulées qui forment le substrat des pyroclastites se sont déversées postérieurement à l'excavation (morpho-tectonique et érosion) de la Plaine des Palmistes qui semble avoir eu lieu pendant la phase II. Une partie est actuellement utilisée en pâturages.
  Une autre partie est encore couverte par la forêt mésotherme associée à des fourrés de goyaviers. Y existent également des reboisements de Cryptomeria ;
- dans la plaine des Cafres : aux endroits épargnés par les coulées plus récentes (ici de la phase IV), en particulier dans les secteurs de :
  - Nez de Boeuf/Rebord de la Grande Montée (1550-2000 mètres),
  - Pâturage de Biberon/Piton Mare à Boue (1550-1700 mètres),
  - Piton Doret (1500-1600 mètres)
  - NE de Piton Hyacinthe (1300-1520 mètres),
  - Trois-Mares-les-Hauts (600-1000 mètres).

Jusqu'à environ 1300 mètres, ces milieux sont cultivés essentiellement en maraîchage (et géranium). Au-dessus, ce sont surtout des pâturages. Une petite partie de la zone de «Pâturage Biberon» est encore sous forêt naturelle. Les défrichements y vont bon train malgré que l'on soit dans la zone domaniale. Il en est de même pour le Rebord de la Grande Montée sur les versants sud, dans les hauts de Saint Joseph et de Vincendo. Il s'agit de :

- Jean-Petit, entre 250 et 900 mètres d'altitude,
- La Crête, entre 250 et 1 950 mètres d'altitude.

A Jean-Petit, l'espace est totalement cultivé en canne à sucre, vétiver, cultures vivrières et maraîchères. Le secteur de La Crête est cultivé en canne jusque vers 650 mètres. De 650 mètres à 1 100 mètres se trouvent des forêts-fourrés secondaires à base d' Acacia decurrens, de goyaviers et de jam-rosats. De 1 100 à 1 500 mètres (ligne domaniale vers 1 300 mètres), il s'agit de la forêt mésotherme à «bois de couleur». L'installation de forêts de production (camphrier) y est en projet côté est. De 1 500 à 1 950 mètres, cette forêt s'enrichit en tamarins des hauts. Au-dessus, on passe dans le domaine de la végétation éricacée de très haute altitude (unité 4).

Au sud de ces grands panneaux, le volcanisme plus récent de la phase IV est venu recouvrir de coulées ou lapilli, les coulées de la phase II (unités 53 et 59).

7.2.1 Mise en place et nature des pyroclastites

Les volcans-boucliers, tel la Fournaise, sont généralement peu explosifs, du fait de la pauvreté en gaz du magma basaltique. Pourtant, même les flancs du massif les plus éloignés du cratère central (15 à 20 km) montrent (sauf sur les coulées les plus récentes) des recouvrements cendreux qui peuvent être importants (1 à 2 mètres). D'autre part, comme nous l'avons dit, l'épaisseur moyenne est d'autant plus importante que les coulées sur lesquelles elles se déposent sont plus anciennes. Pour que cette loi se vérifie, il a donc fallu que la construction de la Fournaise, avec ses phases tectoniques successives, ait connu, depuis au moins la fin de la phase II, des périodes explosives relativement récurrentes (à l'échelle géologique). P.BACHELERY (1981) explique cette activité inhabituelle par la nature phréato-magmatique des émissions, faisant intervenir la vaporisation d'eau d'origine météorique (accumulée par l'infiltration des pluies dans le massif) lors de la montée des laves. Cette vapeur fait augmenter la pression et conduit à des phénomènes explosifs de grande ampleur, à la fois en altitude (plusieurs kilomètres) et en superficies de retombées. Les dernières éruptions historiques de ce type ont été mentionnées dans des annales de 1766, 1791, 1802, 1812 et surtout 1860 (HUGOULIN). Elles ont été répertoriées par LACROIX (1936). L'éruption de 1860 a vu une énorme colonne de fumée et des retombées dans un rayon de 16 km sur 60 000 hectares. Depuis cette date, rien de tel n'a plus été observé. Cela semble correspondre à la fin de l'activité quasi-permanente du Volcan. Par datation C 14, BACHELERY (1981) a pu reconstituer et reconnaître depuis 10 000 ans sur les sommets du Bouclier les dépôts successifs d'une demi-douzaine de gros paroxysmes explosifs (dont les «cendres de Bellecombe» il y a 2 300 ans). Ils pourraient être consécutifs à des effondrements et réajustements volcano-tectoniques au sein du bouclier, ayant suivi des sorties de gros volumes de laves effusives.

Sur les flancs du volcan, perhumides à forêt dense, les cendres accumulées se sont maintenues facilement, sans érosion postérieure. Sur les sommets, la végétation éricoïde plus éparse, n'a pu empêcher leur décapage ; malgré la proximité des centres d'émission, les cendres y sont donc moins épaisses; par contre, les lapilli (émis par des fontaines de lave) ayant été moins loin, sont plus fréquents en altitude que sur les grands versants. Leur importance dans les dépôts, plus grande qu'au sein des cendres du Piton des Neiges, décroît régulièrement en fonction de l'éloignement des zones sommitales, où les cônes de scories, sources d'émission, sont les plus nombreux.

Par rapport à ceux du Piton des Neiges, les niveaux pyroclastiques de la Fournaise sont donc plus récents et pétrographiquement différents.

De teinte générale brune, ils montrent rarement, même quand ils sont assez épais, un litage aussi net qu'au Piton des Neiges. Le fameux «tuf jaune» est ici absent, ce qui permet d'identifier l'origine des dépôts dans les zones

de transition et de mélange (Plaine des Cafres par exemple). Les cendres paraissent relativement homogènes du point de vue classement granulométrique, consolidation et compaction. Localement s'y intercalent des niveaux de lapilli accrétionnés rouge foncé, plus ou moins friables et altérés.

A l'état non altéré, les cendres sont à base de fragments de verre pulvérisé, englobant des minéraux primaires (olivine, plagioclase, pyroxène). Leur composition moyenne (en %) en éléments majeurs (tab. 7.1) est proche de celle des basaltes à olivine :

TAB. 7.1 – *Estimation de la composition chimique moyenne des cendres de la Fournaise*

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2
45	14	11	10	10	2,5	0,8	2,8

Les lapilli sont composés d'élements basaltiques poreux, d'environ 5 mm de large, vitreux, parfois à cristaux d'olivine ou de pyroxène.

Certains secteurs, autour des gros cônes scoriacés, sont très riches en lapilli, particulièrement le sud de la Plaine des Palmistes en périphérie de Piton Doré et de Piton Louis. Les cendres y sont alors associées à des niveaux épais de lapilli rouges. Il en est de même sur le revers du rempart de la Rivière de l'Est (Piton des Cabris, Piton de Moustabismen, Piton des Cochons...) ainsi qu'en contrebas du Nez de Boeuf (Piton Sec, Piton Guichard).

7.2.2 Les sols : Les andosols désaturés non perhydratés (unité 46)

Ce sont toujours des andosols désaturés chromiques. Les uns sont non perhydratés (unité 46), les autres sont perhydratés (unités 47 et 48).

Ces andosols caractérisent les régions qui sont à la fois en situation «intermédiaire» par rapport aux expositions «au vent» et «sous le vent» et à altitude inférieure à 1 000 mètres. Il y a plus de 1 500 mm de pluies moyennes annuelles et plus de 2 mois de saison sèche.

Dans la plaine des Cafres, seule est concernée la petite «boutonnière» de Trois-Mares-Les-Hauts (200 hectares), en cultures vivrières et maraîchères au-dessus de 700 mètres d'altitude, en canne de 450 à 700 mètres. Les pentes y sont relativement faibles (10-15 %).

Au sud, il s'agit de la partie aval de la planèze de Jean-Petit (325 ha), de la Pointe de la Petite Crête (35 ha) et de la Crête-aval (300 ha). Toute cette région est majoritairement sucrière. La pente moyenne y est de l'ordre de 15-20 %.

Les sols sont comparables aux sols équivalents sur pyroclastites du Piton des Neiges que nous avons longuement décrits par ailleurs (unités 32 et 33). Au niveau morphologique, il existe cependant quelques différences :

- La couverture cendreuse est moins épaisse qu'au Piton des Neiges. Ici, l'épaisseur moyenne est de 100 cm ; elle n'atteint 2 mètres que dans les creux, probablement colluvionnés. De nombreux bosselements des coulées sous-jacentes laissent affleurer les basaltes en «gratons», qui rendent le milieu, dans l'ensemble, plus hétérogène qu'au Piton des Neiges.
- Absence de litage caractéristique des dépôts successifs. La couleur d'ensemble du profil est donc ici assez homogène.
- Autre différence : l'absence du «tuf jaune» compact. Alors qu'au Piton des Neiges il peut réduire la profondeur des sols et gêner les racines, ici, cet obstacle n'existe pas.
- A aucun niveau du profil n'apparaissent des concrétions gibbsitiques blanchâtres, comme c'est fréquent pour ces types de sols du Piton des Neiges.

Les caractères chimiques généraux de ces sols sont les suivants :

- Dans l'horizon de surface (0-15/20 cm) : 15 à 20 % de matière organique à C/N assez élevé (13 à

16), pH-eau = 5,1 à 5,2, pH-KCI = 4,3 à 4,7, capacité d'échange cationique faible au pH du sol (8 à 10 mé/100 g). Aluminium échangeable = 0,5 à 1 mé/100 g, phosphore total = 1 000 à 1 500 ppm, phosphore «assimilable» («Olsen, modifié Dabin») = 20 à 50 ppm.

– En profondeur (15/20 à 100 cm) : encore 6 à 10 % de matière organique à 50 cm de profondeur (C/N = 15 à 20) ; pH-eau = 5,1 à 5,6, pH-KCI = 5,3 à 5,9 (pH = -0,2 à -0,4) ; capacité d'échange cationique faible au pH du sol (6 à 8 mé/100 g) ; aluminium échangeable = moins de 1 mé/100 g ; phosphore total = 500 à 800 ppm ; phosphore «assimilable» = 10 à 30 ppm. Densité apparente = 0,4 à 0,6.

En règle générale les andosols non perhydratés de la Fournaise apparaissent donc un peu moins acides que ceux du Piton des Neiges, donc avec moins de risques de toxicité aluminique. Par contre, ils semblent moins riches en phosphore total. Les teneurs en eau sont comparables(Wp= 100 à 150 % à pF 2,5 et 70 à 120 % à pF 4,2).

Les constituants minéralogiques n'ont pas été étudiés dans les sols sur cendres basaltiques de la Fournaise. Par rapport aux sols du Piton des Neiges, compte tenu de leur âge plus récent, on peut s'attendre à une plus grande richesse en allophane siliceuse relativement à l'imogolite, et à une quantité moindre de gibbsite.

7.2.3 Les andosols désaturés perhydratés (unités 47 et 48)

Ce sont les andosols sur cendres épaisses des zones des régions très humides, à plus de 2 mètres d'eau annuels, sans saison sèche (ou celle-ci étant très atténuée par les précipitations occultes, comme à la Plaine des Cafres). Il s'agit des régions de Cambourg et Piton Armand-les-Hauts, du sud de la Plaine des Palmistes, de la Plaine des Cafres, de Jean-Petit et de La Crête.

Par rapport aux précédents, ces sols sont encore plus riches en eau (150 à 300 % d'humidité pondérale à pF 2,5). Ils présentent de ce fait de nets caractères de thixotropie. Ils sont plus acides et plus riches en aluminium échangeable, d'autant plus que l'altitude augmente (tab. 7.2). Ces sols sont souvent plus riches en matière organique (20-25 % à 20 cm sous la litière, 10 à 20 % à 50 cm de profondeur).

TAB. 7.2 – *Estimation des gammes de pH et d'aluminium échangeable en fonction de l'altitude dans les sols perhydratés du massif de la Fournaise*

Altitude	pH-eau		Al+++ (mé/100 g)	
(mètres)	à 15 cm	à 50 cm	à 15 cm	à 50 cm
1700-2000	4,0-4,2	4,4-4,5	4-8	4-5
1300-1700	4,2-4,4	4,5-4,7	3-6	1-3
1000-1300	4,4-4,6	4,7-4,9	2-4	0,5-2
600-1000	4,6-4,9	4,9-5,1	1-3	0,2-0.5
300-600	4,9-5,1	5,0-5,2	0,5-2	0-0,2

Comme les non perhydratés, ces sols sont assez riches en phosphore total (1 000 à 2 000 ppm en A, 1 000 à 1 500 ppm en B) mais très pauvres en phosphore «assimilable» (moins de 50 ppm en A). Leur réserve phosphorique totale est inférieure à celle des sols équivalents sur cendres du Piton des Neiges.

Dans ce grand ensemble, nous avons distingué deux sous-ensembles d'après les pentes générales

– l'unité 47 : pentes générales inférieures à 20 % - Superficie = 2 700 hectares,
– l'unité 48 : pentes générales supérieures à 20 % - Superficie = 7 200 hectares.

L'unité 47 (2 700 ha) intéresse :

– La région de basse altitude (100-450 mètres) de Cambourg et du sud de Piton Armand, essentiellement cultivée en canne à sucre (725 hectares). C'est le secteur où les sols sont les moins acides.
  – Dans la Plaine des Palmistes : sur 600 hectares, les zones de Bras-Piton et de Grand-Fond, situées

entre 1 000 et 1 480 mètres d'altitude, utilisées comme pâturages. Ces secteurs peu pentus correspondent à des gradins et versants d'origine tectonique, formés lors des effondrements du fond de la Plaine des Palmistes, puis moulés par des coulées de fin de phase II et enfin matelassés de cendres et lapilli. Ce sont les endroits de la Plaine des Palmistes où les sols sont les plus épais.

  - Dans la Plaine des Cafres, les secteurs qui n'ont pas été recouverts par les coulées de la phase IV, c'est-à-dire - 1 000 hectares entre 1 500 et 1 900 mètres : Pâturage de Biberon, Piton Doret, Rebord de la Grande Montée, Piton Rouge, Piton Guichard, Piton Sec. C'est dans ces zones (actuellement en pâturages) que les sols sont les plus acides, où les processus de podzolisation paraissent être les plus marqués. - 575 hectares entre 1 000 et 1 500 mètres : NE de Piton Hyacinthe (cultures maraichères et fourragères, prairies) et Bois Court (prairies).

- L'unité 48 (7 200 hectares) concerne :
  - le grand versant nord entre la Rivière de l'Est et la Plaine des Palmistes, entre 450 et 1 850 mètres d'altitude, sur 4 500 hectares. Ce panneau, totalement couvert de forêts, est particulièrement arrosé (4 000 à 5 000 mm de pluies annuelles).
  - le sud de la Plaine des Palmistes, à Bras Piton et Grand Fond, sur 450 hectares, surtout en taillis de goyaviers et forêts (une partie est reboisée en Cryptomeria). Ces pentes fortes (20-30 %) séparent des gradins d'effondrements scellés par des laves de la phase II.
  - les grands versants sud, à Jean-Petit (culture maraîchères) et La Crête (forêt), au-dessus de 600 mètres d'altitude, sur 2 300 hectares.

7.2.4 Problèmes agronomiques

Les andosols non perhydratés (unité 46), peu représentés (Trois Mares Les Hauts, Jean-Petit-aval et La Crête-aval), à pentes faibles (moins de 15 %), sont cultivés à l'heure actuelle en canne à sucre (450-700 mètres) et en maraîchage/vivrier (700-1 000 mètres). Ils sont comparables aux non perhydratés sur cendres du Piton des Neiges qui ont été traités précédemment (unité 32).

Par contre, les andosols perhydratés assez épais sur cendres de la Fournaise (unités 47 et 48) occupent une superficie importante, à différentes altitudes. Ils ont beaucoup de propriétés communes aux perhydratés sur cendres du Piton des Neiges (unités 34 et 35). Ils paraissent cependant plus acides (à altitudes semblables), étant en règle générale plus copieusement et régulièrement arrosés. D'autre part et pour les mêmes raisons, leurs caractères de thixotropie sont plus accusés. Il faut donc s'attendre dans ces sols à de sérieux problèmes de nutrition minérale et de toxicité aluminique d'une part, de portance vis à vis des engins lourds d'autre part.

7.2.5 La canne à sucre

Sont actuellement cultivées en canne les zones de Cambourg-Piton Armand (entre 100 et 450 mètres d'altitude), de La Crête-Parc à Mouton (300 - 750 mètres) et de Jean-Petit (jusqu'à 800 mètres). Comme la région de Sainte Rose, elles sont excessivement pluvieuses (4 000 à 5 000 mm annuels) et ne permettent pas d'espérer de forts rendements en sucre. Uniquement autour de Cambourg, les pentes permettent théoriquement la mécanisation de la coupe. Mais les conditions climatiques défavorables (absence de mois «peu pluvieux») et l'excessive et constante teneur en eau des sols sans armature pierreuse s'y opposent. La portance est insuffisante. Pour la même raison, il faudra éviter le passage de gros camions lors des récoltes.

Lors des dessolages et replantations, les travaux mécaniques posent des problèmes quant aux passages des tracteurs. D'autre part, les labours ou les pseudo-labours aux disques lourds («cover-crop») sont contre-indiqués du fait de la forte adhérence de la terre, de son lissage et de son tassement. D'autre part, la dénudation du sol devrait absolument être évitée dans cette zone per-humide. On est donc dans un cas où le «labour chimique» peut s'avérer indispensable. Dans ce cas, et si des résidus de récolte restent sur place pour protéger le sol de l'action directe des roues, un sillonnage derrière tracteur reste possible, précédant la mise en place des boutures.

Sur ces sols, le chaulage s'avère indispensable, le pH de surface (tab. 7.2) étant aux alentours de 5. Compte tenu du fort pouvoir tampon de ces sols à charges variables, les doses de chaux devraient être aux alentour de 5 à 6 tonnes/ha au moins à chaque replantation.

7.2.6 Les prairies

Au-dessus de 1 000/1 200 mètres d'altitude, dans les Hautes-Plaines sur pentes faibles, les andosols perhydratés sont consacrés essentiellement aux prairies. Dans ces régions, les cendres épaisses sont localisées :

- dans la moitié sud-est de la Plaine des Palmistes (Grand-Fond, BrasPiton),
- dans la Plaine des Cafres : au Pâturage Biberon, sur le rebord de La Grande Montée, au sud de Piton-Tortue, au nord-est de Piton Hyacinthe, à Bois-Court et en aval du Nez de Boeuf.

Les espèces fourragères que l'on peut introduire à ces altitudes sont, concernant les graminées, le kikuyu (Pennisetum clandestinum), le dactyle (Dactylis glomerata), la fétuque élevée (Festuca arundinacea), des Raygrass (italien surtout), la flouve odorante, la houlque laineuse, le brome. Jusqu'à 1 300 mètres d'altitude, des espèces «tropicales» plus classiques des «Bas» marchent encore, bien que produisant moins : Chloris, Setaria, Pennisetum purpureum. Des légumineuses tempérées sont possibles sous certaines conditions (fort chaulage) : luzerne, trèfle, lotier. Entre 1 000 et 1300 mètres (Plaine des Palmistes), des Desmodium (D. intortum et D.incinatum) et une variété ligneuse de Leucaena leucocephala (Salvador) paraissent bien se comporter.

La perhydratation permanente des sols, leur forte acidité posent des problèmes d'installation et de maintien des pâturages améliorés.

C'est surtout dans la Plaine des Palmistes et au nord de la Plaine des Cafres (autour de Piton Tortue) que l'excès d'humidité rend peu recommandables les défrichements au bull et délicats les passages des tracteurs lors des préparations du sol avant installation de l'herbe. Les sols, à faible «armature» caillouteuse, possèdent une portance très réduite. Les défrichements devraient être faits de préférence à la débroussailleuse broyeuse et à la tronçonneuse manuelle (voir Chap. 6). Le travail du sol doit se faire dans un créneau favorable après une période peu humide et pendant un temps court. Le kikuyu (bouturé) est beaucoup plus facile à implanter que les espèces «tempérées» qui demandent au semis un sol propre, affiné et roulé (voir précédemment). Il a l'avantage d'être plus agressif et résistant vis-à-vis des espèces envahissantes (cyperacées, Sporobulus et ajoncs en particulier).

Le bon maintien des prairies demandera une exploitation rationnelle. C'est le pâturage qui est le plus pratiqué. Il faut éviter une charge excessive des animaux. De ce point de vue, les légumineuses tempérées sont les plus fragiles. Kikuyu, fétuque et Chloris (Plaine des Palmistes) résistent mieux ; ce sont les plus agressives et les plus résistantes au surpâturage. Régulièrement fertilisée (azote en particulier), décompactée et aérée par griffage (éclatant les souches), débarrassée de ses «pestes» (lutte mécanique ou chimique), une telle prairie peut se maintenir une dizaine d'années, avec 4 pâtures ou 4 fauches annuelles.

La zone la plus diversifiée sur andosols perhydratés de la Fournaise est la région sud, dans les hauts de Saint-Joseph, Langevin et Vincendo, entre 400 et 1 000 mètres d'altitude. Les pentes générales y sont fortes (plus de 20 %) et l'érosion y est particulièrement à craindre.

7.2.7 Les autres cultures

De 400 à 700 mètres, en association avec la canne à sucre, on trouve des cultures maraîchères et vivrières, du tabac et du vetiver (surtout à Jean-Petit). De 700 à 1 000 mètres, on trouve encore du géranium (en récession), quelques pâturages (Chloris, bana grass, kikuyu...), des pêchers (Jean-Petit).

Cultures annuelles, ananas, géranium et vetiver sont érosifs. Il ne faudrait pas utiliser les pentes supérieures à 20 %. Ces dernières devraient être réservées aux prairies ou aux arbres. Dans tous les cas les pratiques

antiérosives sont impératives. Nous en avons déjà parlé concernant les andosols du Piton des Neiges. Il y a plusieurs techniques associées ou alternatives :

- cordons végétalisés : vetiver, Pennisetum, arbres utiles (goyaviers, caféiers, Leucaena...),
- cultures en bandes alternées (cultures annuelles/cultures pérennes), bandes fourragères absorbantes,
- création de chemins d'eau à faible pentes et enherbés,
- limitation du travail du sol (éviter le rotavator),
- semis et plantations en courbes de niveau,
- couverture permanente du sol si possible : travail minimum, cultures associées à cycles décalés,
- apports fréquents de matière organique (fumier, composts, écumes...).

7.2.8 Les zones forestières actuelles

Le grand panneau de Piton Armand-Les-Hauts, situé entre la Plaine des Palmistes et la Rivière de l'Est, est intégralement couvert de forêt au-dessus de 450 mètres d'altitude. La ligne Domaniale est à environ 1 000 mètres d'altitude, limite supérieure du fourré forestier dense à goyaviers et jam- rosats. Au-dessus, se trouve la forêt hygrophile primitive à «bois de couleur» qui doit être protégée.

La zone susceptible d'être encore déboisée et mise en cultures sur andosols perhydratés épais est donc comprise entre 450 et 1 000 mètres d'altitude (environ 1 600 hectares).

Ce secteur très arrosé (4 000 à 5 000 mm) à pentes fortes (20 à 30 ravines peu profondes mais nombreuses, est très difficile à mettre en valeur. Les sols, bien que relativement profonds (malgré la présence de nombreux ressauts rocheux), sont très acides et très perhydratés. Ils ont une faible fertilité et une grande fragilité physique les rendant très sensibles à l'érosion. La mécanisation motorisée n'y est généralement pas envisageable autant du fait de la pente que de la faible portance. Ils ne sont guère utilisables qu'en prairies extensives. Les cultures annuelles ne sont pas indiquées. De longs travaux préalables de défrichement sont nécessaires, en manuel. Un élevage de cerfs y a été récemment installé.

Le panneau de La Crête-les-Hauts, au-dessus de 700 mètres d'altitude et jusque vers 1 100 mètres, est en majeure partie couvert de boisements secondaires à goyaviers, jam-rosats et Acacia decurrens (anciens terroirs à géranium). Au-dessus, commence la forêt hygrophile à «bois de couleur» à conserver. Entre 700 et 1 100 mètres, le domaine encore cultivable non défriché en 1990 était d'environ 700 hectares. Les pentes sont fortes et les sols peu portants. Le defrichement devrait donc être manuel. Le bull est à prohiber dans ces secteurs perhumides. Les lots attribués par la SAFER (A.3) devraient être suffisamment grands pour permettre de conserver sur les exploitations des bandes boisées de 10 à 30 mètres de large, séparant les bandes cultivées ou, de préférence, les pâturages. Rares sont les secteurs à pentes inférieures à 20 % où pourront être cultivés les plantes annuelles et le géranium, avec toutes les précautions déjà mentionnées. La vocation de cette zone est surtout l'élevage.

7.3 Les saupoudrages de cendres moyennement à peu épais (unités 49 et 50)

Les cendres sont ici moins épaisses (0,50 à 1 mètre) que pour les unités précédentes. Elles tapissent les coulées de la phase III (estimée à 15 00012 000 ans), c'est-à-dire le grand panneau NE du bouclier qui s'étend sur 5 600 hectares, au-dessus de Sainte-Rose et de Piton-Sainte-Rose, depuis la mer jusqu'à 1 600 mètres d'altitude (limite d'apparition des «branles»).

Nous sommes ici, avec 4 000 à 8 500 mm de pluviométrie moyenne annuelle, dans une des régions les plus arrosées de l'île.

Les cultures de canne à sucre montent jusque vers 300 à 425 mètres d'altitude sur des pentes qui augmentent progressivement de 5 % près de la mer, à 20 % vers 400 mètres. Au-dessus, s'étend la forêt sur des pentes fortes

le plus souvent supérieures à 20 % :

- de 300/425 à 500/600 mètres : «fourré forestier secondaire» dense à goyaviers et jamrosats,
- de 500/600 à 1 000 mètres : forêt complexe mégatherme hygrophile à «bois de couleur»,
- de 1 000 à 1 600 mètres : forêt complexe mésotherme hygrophile «à bois de couleur»,
- au-dessus de 1 400 mètres, sous 8 à 9 mètres de pluies annuelles et lorsque les pentes y sont inférieures à 25 %, la végétation devient encore plus hygrophile. Elle passe aux fourrés à Pandanus montanus, Helichrysum, Philippia, Senecio ambavilla ; émergent des palmistes (Acanthophoenix tubra) et des fougères arborescentes (Cyathea glauca).

7.3.1 Le modelé

Le grand panneau des hauts de Sainte-Rose présente le profil concavoconvexe typique de l'édifice-bouclier : augmentation régulière des pentes depuis la mer jusque vers 1 300 mètres d'altitude où elles atteignent leur maximum (point d'inflexion du profil), puis décroissance progressive vers le dôme sommital.

La toposéquence moyenne est ainsi la suivante :

- de la mer à 200 mètres d'altitude : long «glacis» littoral de 5 à 10 % de pente sur environ 1,5 kilomètre,
- de 200 à 500 mètres : 10 à 20 %,
- de 500 à 950 mètres : 20 à 30 %,
- de 950 à 1 300 mètres : 30 à 40 %,
- de 1 300 à 1 450 mètres : 30 à 20 %,
- de 1 450 mètres à 1 600 mètres : 20 à 10 %,
- au-dessus de 1 600 mètres : 10 à 5 % (jusqu'au «Plateau» de la Rivière de l'Est).

Ce profil général est perturbé par la présence d'une douzaine de gros édifices de scories, larges de 300 à 500 mètres, hauts de 30 à 80 mètres. En amont de ces cônes, les coulées postérieures, ralenties dans leur progression, se sont épaissies sur quelques dizaines d'hectares (Piton des Galets, Piton de Balmann, Piton La Glace, Piton Moka, Piton des Trois Têtes, Piton Sinific).

D'autre part, des glissements de grande ampleur du flanc du bouclier peuvent expliquer de vastes ressauts et replats «anormaux» discontinus en travers du profil général concavo-convexe.

Près de la côte, l'irrégularité des actions antagonistes des remblaiements volcaniques en mer et des sapements marins explique la présence d'anciennes falaises littorales à l'intérieur des terres, non totalement moulées par les laves. Les plus grosses avancées en mer forment des «plateaux» rocailleux sub-horizontaux peu couverts de cendre: Pointe de Sainte Rose, Pointe de Bellevue, Pointe des Cascades. Le déversement des laves de l'éruption de 1977 a ainsi formé en mer à Piton-Sainte-Rose un plateau de 500 mètres recouvrant la falaise littorale antérieure. L'érosion marine très active tend à récupérer le littoral initial.

La dissection par le réseau hydrographique est peu avancée. Les ravines ont très peu entaillé le substrat. La plupart du temps, les axes d'écoulement des eaux suivent la morphologie volcanique des coulées superposées, telles que les bordures de coulées et les chenaux entre les bourrelets d'écoulement rapide des laves. Les ravines ne sont que très rarement bordées de parois verticales. La route des Hauts (Chemin Touzet), à 400 450 mètres d'altitude, franchit directement les talwegs (sans virages, sur radiers, buses ou petits ponts).

Un modelé de détail se surimpose aux pentes générales et rend, au niveau local, la topographie très irrégulière avec de nombreux ressauts et bossellements. Cette morphologie est due à la dynamique d'accumulation des coulées s'empilant les unes sur les autres, à leurs différences locales de refroidissement et de fluidité/viscosité (commandant leurs débits sur une pente générale donnée), à leur degré de dégazage.

Les bossellements des versants, en règle générale, ont des pentes, amplitudes et «pseudo-périodes», plus ou moins prononcées, en relation avec la valeur de la pente générale. Plus cette dernière est élevée, plus les bossellements paraissent rapprochés et escarpés, donc gênants pour l'agriculture.

7.3.2 Les sols

Ce sont des andosols désaturés perhydratés «classiques» (cf. unités 47 et 48). Le basalte, qui affleure souvent, ne montre pratiquement pas d'altération, sinon un début d'altération andique gras, jaunâtre ou noirâtre, autour des éléments scoriacés («gratons»).

Les cendres, assez peu épaisses, sont insuffisantes pour napper l'ensemble du modelé. Pouvant atteindre 50 centimètres sur les replats et 1 mètre dans les creux où elles ont glissé, elles sont inexistantes sur les ressauts. Ceux-ci laissent donc affleurer le basalte massif inaltéré ou en «gratons» blocailleux scoriacés à minime altération en surface.

Les sols sur cendres sont identiques à ceux décrits pour les unités 47 et 48. Ils sont de couleur beige brunâtre homogène, de toucher limono-argileux, très riches en matière organique en surface (15 à 20 %) sans être particulièrement assombris. Ils présentent des caractères de perhydratation nets : 150 à 250 % d'humidité pondérale à pF 2,5, thixotropie marquée (contrainte importante pour la mécanisation de la canne à sucre).

Au-dessus de 600 mètres, le pH descend régulièrement pour atteindre 4,4 à 1 600 mètres (cf. tab. 7.2).

La faible altération sur lave scoriacée basaltique désagrège et libère en surface des graviers et sables associés à de la matière organique. Autour des éléments, le verre basaltique libère une fine pellicule de plasma (amorphe), jaune ou noirâtre, humide et gras.

Ce matériau, exploitable par les racines, a un pH un peu plus élevé (5,4 à 5,7) que celui de l'andosol sur cendres.

Lorsque le basalte est massif (dalle de coulée «pahoehoe» ou partie massive de coulée «aa»), l'altération est inexistante. Seule peut apparaître, seulement en conditions très acides d'altitude, en surface de la dalle, une auréole orangée de solubilisation ferrugineuse par la matière organique agressive.

Enfin, il faut signaler la présence, entre 1 400 et 1 600 mètres d'altitude (pluviométrie 8 à 9 mètres), sur les zones à pentes inférieures à 20 % et sur coulée «pahoehoe», d'andosols sursaturés en eau, à drainage bloqué en profondeur par la formation d'un alios imperméabilisant. Ils sont comparables à certains sols de la Plaine des Palmistes (unité 57). Ces zones hydromorphes sont occupées par un fourré à Pandanus montanus, Senecio ambavilla, Philippia...

7.3.3 Contraintes agronomiques

Ce secteur, le plus humide de l'île (200 jours de pluie par an), est entièrement cultivé en canne à sucre jusque vers 300-425 mètres d'altitude.

La présence d'un fourré-forestier à goyaviers et jam-rosats jusque vers 500600 mètres indique que les plantations (café puis canne) montaient autrefois (XVlllè siècle) jusqu'à cette altitude. Au-dessus s'étend la grande forêt Mourouvin, à bois de couleur.

L'hyperhumidité du climat est une contrainte en soi affectant les rendements en sucre. Un autre facteur défavorable est ici l'abondance des affleurements rocheux (bordures et fronts de coulées) et l'hétérogénéité du recouvrement cendreux. Il y a une imbrication complexe de poches d'andosols assez épais (1 mètre) extrêmement thixotropes, à faible portance, et de bosses et ressauts rocailleux. Les engins lourds s'enfoncent par manque de portance, compliquant les travaux «classiques» de défrichement, d'épierrage, de dessolage et de récolte. Au-dessus de 300 mètres d'altitude s'y ajoutent les difficultés dues aux fortes pentes.

Les défrichements au bull sont à proscrire pour les raisons déjà évoquées : ripper, râteau et poids du bull bouleversent le sol perhumide en décollant et raclant la couche humifère, tassant et lissant la surface, initiant ainsi l'érosion en ravines. La débroussailleusebroyeuse à axe rotatif horizontal étant rarement utilisable à cause de l'abondance des blocs superficiels et des pentes, le travail de défrichement de nouveaux terrains devrait être entièrement manuel (tronçonneuse).

Les replantations de canne pourraient se faire sans dessolage en utilisant les herbicides totaux. Le sillonnage peut se faire au tracteur sur couverture morte améliorant la portance, à condition qu'elle ne soit pas trop épaisse (sinon il y a bourrage) et à peu près selon les courbes de niveau.

Les grandes difficultés d'un bon épierrage et de la pénétration du matériel dans les sols éliminent pratiquement la possibilité de la récolte mécanique.

En dehors de la canne, pour laquelle les conditions de culture sont donc difficiles, que peut-on envisager comme diversification dans ce secteur ?

- L'arboriculture fruitière : la quasi-saturation permanente en eau (absence d'aération) du sol convient mal aux enracinements des arbres. L'humidité ambiante et le faible ensoleillement favorisent les maladies (spécialement sur agrumes et avocatiers). Letchis et bananiers paraissent les mieux adaptés, mais il reste toujours le problème de leur faible résistance aux vents cycloniques violents.
- Les cultures maraîchères : actuellement, elles sont peu pratiquées. Les conditions pédo-climatiques sont peu favorables pour faire du maraîchage intensif (de rente). L'excessive humidité, l'adhérence de la terre (ressuyage insuffisant) s'opposent à une bonne préparation des lits de semence, condition nécessaire pour la plupart des cultures maraîchères en culture pure. L'absence de saison sèche rend difficiles les plantes à bulbes, racines et tubercules (pomme de terre, patate, oignons, carottes...).

La solution qui nous paraît la meilleure, si elle est possible, est le semis direct (ou sillonnage-plantation) après désherbage total, sous couverture permanente contrôlée aux herbicides sélectifs. Si cette technique s'avère possible dans les Hauts (voir ci-dessus), elle n'est pas encore démontrée sous un climat chaud perhumide (fortes croissances).

Les cultures maraîchères et vivrières à cycles courts, semées en intercalaires de rangs de canne (juste après la récolte) sont possibles (maïs, haricot, arachide, tomates...) et ont l'avantage d'exposer peu le sol à l'érosion. Un travail minimum du sol (sillonnage, semis...) au motoculteur est alors possible. Le sarclage doit être de préférence chimique, compte tenu de la tendance à la prolifération des adventices.

Quelles que soient les techniques de cultures, maraîchères et vivrières, il ne faudra pas les pratiquer sur pentes supérieures à 10 % (donc en dessous de 200 mètres d'altitude) et s'arranger pour qu'à aucun moment des parcelles soient entièrement découvertes.

. Les prairies

L'élevage est peu développé dans cette zone. Traditionnellement les planteurs de canne possèdent 1 à 3 bovins affouragés au parc ou à l'étable avec des «choux de canne». Il n'y a pas de surfaces fourragères. En dessous de 300 mètres d'altitude (sur pentes inférieures à 20 %), on peut envisager une certaine intensification de l'élevage avec des assolements «canne-prairie». Les graminées fourragères possibles sont : Chloris, Bracharia, Setaria, Pennisetum, Hemarthria ; les légumineuses peuvent être: Stylosanthes, Desmodium, Glycine...

L'implantation et le maintien de «bonnes» prairies seront assez délicates pour diverses raisons, en particulier :

- l'absence de périodes sèches pour la préparation du sol et les semis (thixotropie, pas de ressuyage),
- la forte concurrence des adventices (cyperacées...).

Chaulage de fond et forte fertilisation azotée répétée dans l'année (à chaque coupe ou rotation de pâture) seront nécessaires. L'exploitation en pâture directe devra éviter la surchage animale sous peine d'une dégradation

rapide (tassement superficiel, envahissement par les «pestes»). En dessous de 300 mètres, les pentes faibles permettront l'exploitation en fauche sur les parcelles faiblement caillouteuses. Au-dessus de 300 mètres d'altitude, les pentes excessives (plus de 20 %) ne pourront qu'être pâturées.

7.4 Les coulées à piégeages de cendres peu épais (unités 51 à 58)

La phase IV de la Fournaise concerne essentiellement les épanchements qui se sont étalés dans la vaste gouttière séparant ce massif de celui du Piton des Neiges, selon une direction NE-SW : Sainte Anne - Plaine des Palmistes - Plaine des Cafres - Saint Pierre. Elle englobe aussi, au sud, la série de sorties situées entre La Ravine des Cafres et le rempart de BasseVallée, formant une demi-douzaine de panneaux triangulaires recouvrant les coulées des phases 1 et 2.

L'ensemble des produits de la phase IV (basaltes à olivine) représente environ 19 000 hectares. Son âge peut être estimé à 8 000-10 000 ans. Les cendres postérieures ont saupoudré ces coulées sur une faible épaisseur (inférieure à 50 cm) et de façon très irrégulière.

Dans la région sous le vent, au sud (entre Le Tampon et Saint Pierre), ces placages cendreux ont été totalement éliminés par l'érosion. Le basalte ne présente une altération sensible que dans ce secteur.

A l'intérieur de ce vaste ensemble se différencient un certain nombre d'«unités de milieu» commandées par :

- l'exposition et l'altitude (régime des pluies, températures),
- la nature physique des laves («aa», «pahoehoe»,..),
- les pentes générales.

Ces 3 ensembles de paramètres suffisent à spécifier : la nature des altérations sur cendres et coulées, le mode de piégeage et le degré de décapage des cendres, les conditions de drainage en profondeur.

7.4.1 Les régions «sous le vent» de basse altitude sans cendres (unités 51 et 52) : Localisation

Cela concerne les zones situées en dessous de 300 mètres d'altitude :

- Le secteur de Saint Pierre/Ravine des Cabris/Bois d'Olive, traversé par le Chemin Paradis : 2 000 hectares dont 40 % en zone urbaine, le reste en canne à sucre irriguée ;
- Le secteur de Grand Bois : 800 hectares dont 15 % en zone urbaine littorale, le reste en canne à sucre irriguée (épierrage réalisé).

La pluviométrie moyenne annuelle est de 1 000 à 1 300 mm ; il y a 5 à 6 mois à moins de 100 mm dont 3 mois «secs» (à moins de 50 mm). La température moyenne annuelle est de 23-24 ˚ . C'est une zone ventée (vents de secteurs est et sud-est). L'ensoleillement est le plus important de l'île (2 600 à 3 000 heures par an).

Les coulées de basaltes fluides sont de type «aa» (en «gratons»). Dans la région de Saint Pierre, elles ont dévalé des hauts du Tampon et de La Plaine des Cafres. Le lieu d'émission des coulées de Grand Bois est le Cône de scories de Montvert. Les coulées y ont recouvert l'altération ferrallitique des basaltes de la phase I de la Fournaise. Entre la Ravine Blanche et Bois d'Olive, les coulées de phase IV se sont épanchées et appuyées en terminant leur parcours sur les nuées ponceuses tuffacées de la phase VI du Piton des Neiges (unité 44). A ce niveau , les coulées terminales sont très peu épaisses (quelques mètres).

7.4.2 Le modelé

Il présente une pente générale peu accentuée : 5 à 10 % au-dessus de Saint Pierre et 10 à 15 % au-dessus de Grand-Bois. Les coulées de Grand Bois ont scellé une ancienne falaise littorale creusée dans les basaltes de la phase I. Cette ligne de reliefs, émoussée par le nappage (25 à 30 % de pente, 20 à 40 mètres de dénivellation) est actuellement située à 250/500 mètres du rivage actuel (unité 52).

Cependant, dans le détail, la pente générale est loin d'être régulière. Elle est coupée par un micro-modelé marquant les coulées successives se chevauchant : bourrelets latéraux des langues d'écoulement, fronts et bordures de coulées (petits escarpements de quelques mètres, blocailleux), bossellements. L'altération réduite et la faible érosion (qui n'a décapé que les cendres récentes) n'ont pas effacé la topographie complexe d'empilement des coulées.

Les axes hydrographiques empruntent souvent les chenaux d'écoulement (bordés de «levées») de plus forts débits des laves. Il n'y a pratiquement pas de ravines de creusement par les eaux. Les planèzes de Montvert-Grand Bois ne présentent même pas d'axes d'écoulement privilégié.

7.4.3 Les sols

L'altération des basaltes est assez peu avancée et très irrégulière (photo A.43). Les parties scoriacées des coulées «aa» libèrent de nombreux éléments anguleux.

Les sols sont donc généralement assez peu épais (moins de 70 cm), caillouteux en surface (sauf quand ils ont déjà été épierrés) et en profondeur. La matrice fine est brun foncé finement structurée (éléments cohérents) en surface, brun jaunâtre, à structure polyédrique grossière, en dessous.

La proportion et la taille des cailloux ainsi que la compacité de l'ensemble augmentent avec la profondeur. Entre 20 et 70 cm de profondeur, il y a environ 60 % d'éléments grossiers de plus de 2 cm dont 30 à 40 % de 10 à 50 cm de large. A 70 cm, cette proportion atteint 70-80 %. Les éléments altérés prennent, en leur périphérie, une teinte jaune.

La couleur d'ensemble du profil passe donc du brun foncé en surface (020 cm), puis au brun (20-60 cm) puis au jaune (60-100 cm) avec des passées noirâtres en profondeur.

Au sein de ces zones à sols relativement meubles, existent de très nombreuses plages très blocailleuses, à pentes plus fortes, correspondant aux rebords de coulées.

Une grande partie de ces sols bruns sont irrigués (à la raie et par aspersion) depuis longtemps (25 à 30 ans) et sans souci d'économie d'eau.

Les propriétés chimiques sont correctes : le pH est compris entre 6 et 7 ; le taux de matière organique est de 4 à 5 % en surface (C/N = 9 à 10) et 1 à 2% entre 20 et 50 cm. Le complexe adsorbant de la terre fine possède une capacité d'échange de 15 à 20 mé/100 g et une saturation de 80 à 95 (environ 10 mé de Ca++, 4 mé de Mg++, 1,5 mé de Na).

7.4.4 Qualités agronomiques

Fertilité

La majeure partie de la région est en monoculture de canne à sucre irriguée et appartient au périmètre du Bras de La Plaine (géré par la SAPHIRA.3). On commence à voir de plus en plus de parcelles de maraîchage, d'ananas et d'arboriculture alors que l'arachide et le tabac, assez courants autrefois, sont en nette régression. Le maïs et le haricot, en «pur» ou en intercalaire de la canne, se maintiennent. Les cultures fourragères sont rares. L'urbanisation a une emprise assez importante.

Ces sols bruns récents des basaltes de la Fournaise sont sensiblement moins épais et plus caillouteux que les sols bruns non ferruginisés du Piton des Neiges (unités 19 et 20), ces derniers étant beaucoup plus anciens.

Leurs contraintes intrinsèques proviennent (lorsque l'épierrage n'a pas été fait), d'une part d'une charge importante en cailloux et blocs anguleux («gratons» de coulées) en surface et en profondeur, d'autre part d'une épaisseur généralement faible, et en tout cas d'une grande irrégularité (30 à 100 cm) sur de courtes distances, même à l'échelle de la parcelle (photo A.43).

Une autre contrainte qui était la plus importante autrefois mais à laquelle on remédie maintenant par l'irrigation, est le fort déficit hydro-climatique de la région (P - ETP) : ce déficit varie de 600 mm (à l'ouest de Saint Pierre) à 400 mm (à 400 mètres d'altitude au nord et à Grand-Bois à l'est). Il dure 7 à 8 mois (mai à décembre). La plupart des cultures demanderont donc une irrigation quasi permanente pendant cette période et d'appoint en été, d'autant plus que les sols bruns caillouteux ont une réserve utile faible, comprise entre 40 et 80 mm (suivant leur épaisseur et leur pierrosité). Leur perméabilité est élevée du fait de leur excellente structure (renforcée par la culture de la canne) et de leur richesse en cailloux. Il y a davantage de risques de pertes d'eau en profondeur (drainage) qu'en surface (ruissellement). Les doses d'irrigation devront donc être faibles (20 à 60 mm). L'aspersion et le goutte à goutte conviennent bien. Le goutte à goutte est plus souple d'utilisation et possède une meilleure efficience que l'aspersion qui est plus difficile à moduler et est gênée par le vent.

Antérieurement à 1970, seule la zone située en dessous de 100 mètres d'altitude, à l'ouest de la Rivière d'Abord, était irriguée (à la raie) depuis très longtemps (XIXè siècle) à partir du canal Saint-Etienne. Depuis les années 1970, les amenées d'eau sous pression à partir du Bras de La Plaine, permettent d'irriguer par aspersion jusqu'à 350 mètres d'altitude et jusqu'à Petite Ile (réseau exploité par la SAPHIRA.3). Actuellement, l'eau disponible à la demande aux bornes, à faible coût, incite à une consommation excessive entraînant un certain gaspillage. Le débit d'étiage (3,70 m^3/s) à l'amont du réseau est à peine suffisant en décembre pour l'ensemble du périmètre et interdit un pompage pour irriguer au-dessus.

Du point de vue chimique, ces sols bruns sont de bonne qualité. Ils présentent des caractéristiques analytiques intéressantes : pH compris entre 6 et 7, 4 % de matière organique, complexe adsorbant ayant jusqu'à 20 mé de capacité d'échange, presque saturé en bases. Ils ne possèdent pas de carences majeures, sinon une légère en phosphore. Les essais en vases de végétation (FRITZ, 1967) ont cependant également montré une légère carence en soufre. La nitrification et l'alimentation azotée sont bonnes ; il n'y a pas de rétrogradation de phosphore. Les faibles doses d'engrais sont toujours bien utilisées. Enfin, ces sols ne nécessitent pas de chaulage.

Pierrosité et mécanisation

L'histoire foncière de ces terres explique en grande partie leur configuration et leur état actuel :

- le secteur de Cafrine/Grand Bois était jusqu'en 1988 la propriété des Sucreries de Bourbon qui avaient depuis très longtemps fait procéder, de façon progressive, à un bon épierrage (grossier et fin) et à une structuration en grandes parcelles, de façon à permettre une mécanisation intégrale des terres (sur 60 % de la superficie) et une irrigation par aspersion. Les produits d'épierrage sont disposés en gros andains, selon les courbes de niveau en bordure des chemins d'exploitation. Ces terres, rachetées par la SAFER (A.3), sont en cours de rétrocession (en faire-valoir direct) par lots de 5 à 10 hectares. Les sols, en principe, ne nécessitent donc plus d'épierrage et sont donc en bien meilleur état qu'au nord de Saint Pierre.
- au nord de Saint pierre, jusqu'à la Ligne des Bambous-Ravine des Cabris, la situation est plus complexe. Une partie des terres (Mon Repos, Ravine des Cabris...) appartenait à la Société Bénard et était exploitée (sans mécanisation au tracteur) en micro-parcellaire (0,8 à 3 ha) par des «colons» qui n'avaient retiré que les gros blocs. Entre 1970 et 1982, la SAFER (A.3) a racheté et rétrocédé ces terres en lots de 5-7 hectares («moyens planteurs») qui, pour certains, ont fait procéder à un épierrage grossier au bull pour permettre des travaux mécanisés. Mais, en général, cet épierrage est encore très insuffisant pour permettre la mécanisation de la récolte.

Une autre situation est celle de Chemin Paradis-Mon Caprice-Ligne des Bambous qui comprend encore une majorité de «petits» planteurs, en colonat le plus souvent, dont les exploitations sont comprises en 1,5 et 3 hec-

tares et dont les parcelles sont les plus mal épierrées. Cette situation est la plus défavorable à la mécanisation de la canne à sucre.

Enfin, il y a une dizaine de grosses propriétés individuelles, de 15 à 120 hectares, qui ont bénéficié d'un épierrage minimum permettant parfois une semi-mécanisation mais pas la coupe.

Donc si le secteur doit se maintenir en canne à sucre, compte tenu de la rareté de la main-d'oeuvre, il faudra envisager la mécanisation de la coupe. Cela impose de gros travaux d'épierrage pour tout ce qui est supérieur à 5 cm. La technique paraît maintenant au point, avec l'épierreuse «Kverneland», ajustée par le CEEMAT (A.3) (voir Chap. 6). La présence de nombreux «caps» rocheux rend cependant cet épierrage très délicat.

Le problème est qu'au moment du dessolage, des travaux de préparation (disques) et de sillonnage, les cailloux sont remontés en surface pouvant toujours gêner le passage de la coupeuse. Il faut donc procéder à un roulage final pour «enfoncer» à nouveaux les cailloux. Une autre solution est le travail minimum (simple sillonnage léger) et le désherbage chimique, ayant l'avantage de protéger le sol de l'érosion pendant les premiers mois après la replantation.

L'épierrage fin sera également nécessaire si se développe le maraîchage intensif ou semi-intensif (en culture de rente) en petite mécanisation (minitracteur ou motoculteur).

Les systèmes de cultures

Actuellement le système est simple : la monoculture de canne à sucre. Parfois, il y a rotation courte avec du maïs/haricot restant une année. Sinon le vivrier auto-consommé est cultivé en intercalaire de canne après la replantation ou en début de repousse. La zone de Ravine des Cabris pratique le plus le maraîchage.

En diversification des cultures irriguées, il y a de nombreuses possibilités en fonction de la taille des exploitations et de la place que l'on décide de réserver à la canne à sucre et à l'épierrage. Les assolement et rotations peuvent intégrer les productions suivantes : cultures vivrières (maïs, haricot, arachide...), cultures maraîchères (tomates, ail, oignons, aubergines, piments, choux, carottes, concombres...), ananas, arboriculture fruitière (manguiers, agrumes, papayers...), vigne, cultures fourragères intensives en prairies de fauche (Chloris, Setaria, Pennisetum, Panicum...; Desmodium, Glycine, Stylosanthes...), cultures florales.

De multiples combinaisons sont possibles. Elles dépendent de beaucoup de facteurs «socio-technico-économiques» : taille des exploitations, place réservée à la canne à sucre, importance accordée à l'élevage, technicité de l'agriculteur, degré de mécanisation, etc.

L'évolution de la région pourrait être une diminution des surfaces en cannes peu productives, c'est-à-dire sur les parcelles trop petites ou trop caillouteuses pour espérer être mécanisées (coupe comprise). La canne pourrait être remplacée par des cultures pérennes telles que la vigne (recherches en cours par l'IRFAA.3) ou l'arboriculture fruitière.

7.4.5 Les régions d'exposition «intermédiaire» à moyenne et basse altitude sans cendres (unité 53)

Localisation

Nous sommes ici, sur 4 300 hectares, en région plus humide, où ne subsistent que de rares placages cendreux.

- Le plus grand ensemble, au-dessus de la zone précédente, concerne la région du Tampon (2 400 hectares) entre 300 et 800 mètres d'attitude, avec une pluviométrie annuelle de 1 400 à 1 500 mm.
- Au sud, appartiennent à cette unité de milieu les 5 panneaux suivants dominés par de gros cônes de scories d'où sont sorties des laves de la phase IV :
  - Montvert (300 hectares), entre 250 et 500 m d'altitude ; pluviométrie = 1 400 mm.

- Petite île (400 hectares) entre 200 et 650 m d'altitude ; pluviométrie = 1 500 mm.
- Manapany (370 hectares) depuis la mer jusque vers 600 m ; pluviométrie = 2 000 mm.
- Saint Joseph (370 hectares), 0-250 mètres ; pluviométrie = 2 000 mm.
- Vincendo (240 hectares), 0 à 300 mètres ; pluviométrie = 3 000 mm.

Ces deux dernières régions appartiennent déjà à la zone «au vent», sans saison sèche.

L'espace agricole est cultivé essentiellement en canne à sucre. Les régions de Saint Joseph, Manapany et Petite île se consacrent aussi beaucoup au maraîchage (ail surtout), secondairement aux cultures vivrières et fruitières et au tabac.

Le modelé et ses origines

Dans la région du Tampon, les pentes générales moyennes des versants sont comprises entre 5 et 15 %. Sur les panneaux sud, elles sont plus élevées (10 à 20 %). Les entailles par le réseau hydrographique sont généralement insignifiantes ; il y a peu de véritables ravines encaissées (Ravine des Cabris, Ravine Blanche). Les eaux ont creusé préférentiellement au contact des coulées de phase IV avec les coulées plus anciennes et altérées qu'elles ont recouvert : Rivière d'Abord, Ravine des Cafres, Ravine de l'Anse, Ravine du Pont, Ravine de la Petite île, Ravine de Manapany, Ravine des Grègues, Ravine Vincendo, Bras Panon...

Toutes les coulées du sud sont dominées par de gros cônes de scories égueulés signalant généralement leurs lieux de sorties. Ces édifices, qui ont craché d'importants volumes de lapilli (voir unité 59), s'alignent sur une direction est-ouest correspondant probablement à une ligne de faiblesse d'où sont sorties des laves de phase IV.

Entre Petite île et Langevin s'observe un escarpement moulé par les coulées de phase IV. Cette ligne de reliefs dominant des «plateaux littoraux» (larges de 1 500 mètres à Saint Joseph), pourrait correspondre à un vaste glissement de la base du bouclier au sein des coulées de la phase I. Il n'est probablement pas indépendant de l'alignement des édifices volcaniques.

En cours de phase IV, l'escarpement morphotectonique a localement été repris en falaise littorale. Cette ancienne falaise est située à 200 mètres en arrière de la falaise actuelle, entre Grand-Bois et Manapany. Il en est de même à Vincendo.

En fait, toute la côte, depuis Saint Pierre jusqu'à la rampe de Basse Vallée, est constituée d'une haute falaise (20 à 100 mètres) qui semble indiquer que le glissement de grande ampleur en mer des basses pentes du bouclier est encore fonctionnel. Le recul de la côte par sapement marin est activé par cette morpho-tectonique. Plus en amont, l'effondrement localisé de la Plaine des Grègues (au sein de la phase I) pourrait être un contre-coup de ce vaste glissement.

Les sols

Ils présentent des ressemblances avec les sols de l'unité précédente (unité 51). Le matériau est le même ; il s'agit de coulées basaltiques du type «aa»(sauf celles de Petite île, de type «pahoehoe»), à blocs scoriacés, donnant naissance à des sols bruns caillouteux, d'épaisseur moyenne très irrégulière (40 à 80 cm).

Par rapport aux sols de l'unité 51, sous plus faible pluviométrie, ici les sols présentent dans l'horizon B, des colorations jaunâtres.

L'argilification est également moins nette ; les cailloux jaunis en surface par l'altération sont emballés dans une matrice argilo-gravillonnaire meuble, ne montrant plus aucune compacité. A l'état humide, la structure est polyédrique arrondie et peu cohérente. A l'état sec, entre les cailloux, ce matériau gris jaunâtre et fragile a tendance à «couler» entre les doigts. La proportion d'éléments grossiers scoriacés et leur taille augmentent

avec la profondeur. En surface, la structure montre des agrégats émoussés, de faible cohérence, se prêtant bien au maraîchage, mais particulièrement sensibles à l'érosion.

En surface, ces sols sont relativement riches en matière organique (4 à 6%). Le C/N est de 9 à 10. Leur pH varie entre 6 et 6,5, il est légèrement inférieur à celui des sols bruns précédents. La capacité d'échange en B est assez élevée : 13 à 20 mé/100 g. Le complexe est saturé à 75-85 % (calcium largement dominant).

Au-dessus du Tampon, au sein de ces sols bruns sur basalte, peuvent déjà se trouver quelques placages cendreux dispersés, de 20 à 40 cm d'épaisseur, à sols bruns andiques. Ces cendres deviendront de plus en plus systématiques en montant vers la Plaine des Cafres (unités 54, 55, 57, 58).

De même, au sud, autour des «Pitons», les sols bruns sur coulées sont souvent «pollués» par des placages de lapilli formant la transition avec les sols développés exclusivement sur lapilli épais de l'unité 59 (voir plus loin).

Qualités agronomiques

Le «déficit climatique» est ici de 400 à 200 mm, d'ouest vers l'est. L'irrigation de la canne à sucre n'est pas une absolue nécessité. Cette zone est d'ailleurs au-dessus du périmètre du Bras de La Plaine. Actuellement, les débits d'étiage du réseau sont insuffisants pour envisager un pompage.

Les caractéristiques de ces sols bruns (contraintes et aptitudes) sont voisines de celles des sols bruns précédents d'altitude inférieure. Leur structure est cependant plus fragile et ils sont plus sensibles à l'érosion, d'autant plus que les pentes sont souvent plus fortes (10 à 20 %). Les contraintes principales sont toujours la pierrosité importante et la faible épaisseur (30 à 80 cm), leur extrême irrégularité. Par contre, leur fertilité chimique est bonne. Avec des pH supérieurs à 6, le chaulage n'est pas nécessaire.

Ici, les sols n'ont jamais été bien épierrés. Le parcellaire est petit, les exploitations sont de faibles superficies (1,5 à 3 ha en colonat le plus souvent). La mécanisation de la canne n'y est guère possible.

Les zones les plus humides pratiquent beaucoup le maraîchage (ail, oignons, tomates, aubergines, piments...). Il s'agit surtout des régions de Manapany et de Saint Joseph. Les secteurs qui ont été finement épierrés (à la main le plus souvent) sont de plus en plus travaillés en petite mécanisation (motoculteur). Le rotavator, très pratique, est beaucoup utilisé, mais il a une action néfaste sur les sols, qu'il pulvérise et rend très sensibles à l'érosion. La méthode traditionnelle et manuelle de semis dans les «poquets» (trous rectangulaire de 30 x 15 cm, profonds de 15 cm) est plus conservatrice.

Les pentes supérieures à 10 % (Montvert, nord de Petite île, Vincendo) ne devraient pratiquer le maraîchage qu'avec d'extrêmes précautions : travail du sol et semis en courbes de niveau, cordons végétalisés assez rapprochés (tous les 15 à 25 mètres), bandes de cultures alternées, etc. Si possible travail minimum (sillonnage au motoculteur) et désherbage chimique.

L'arboriculture fruitière (agrumes, litchi, avocatier...) nous paraît bien adaptée à ce type de sols, au moins dans la partie est (de Montvert à Vincendo). La région du Tampon, à déficit hydrique plus marqué et soumise au foehn, risque d'être un peu «sèche». L'ananas sous plastique y donnerait de bons résultats.

7.4.6 Les régions «au vent» à piégeages de cendres (unités 54 à 58)

Ce vaste ensemble intéresse, d'une part la Plaine des Cafres, entre 800 et 1600 mètres d'altitude avec une pluviométrie annuelle de 1 600 à 3 OOO mm, d'autre part la zone centre-orientale, du niveau de la mer (Sainte-Anne) à la Plaine des Palmistes vers 1 300 mètres, arrosée par 4 000 à 5 000 mm.

Les zones de basse et moyenne altitude (unité 54)

- Au nord-est : il s'agit des zones de la Confiance et de Sainte Marguerite qui s'étendent sur 3 500 hectares, depuis la mer (Sainte Anne, Saint François) jusqu'à environ 450 mètres d'altitude, au pied de la montée vers la Plaine des Palmistes. Cette zone est intégralement cultivée en canne à sucre.
- Au sud-ouest : elles concernent sur 1 600 hectares, la tranche d'altitude 800-1 400 mètres : ce sont les secteurs du «Quatorzième», du «Dixseptième» et du «Dix-neuvième». On y pratique surtout des cultures maraîchères, vivrières et fruitières ainsi que du géranium. Une grande partie (1/3) y est en habitat.

Du fait des différences climatiques (pluies et températures), ces 2 régions n'ont pas les mêmes aptitudes culturales. Les sols y sont cependant comparables, c'est pourquoi nous les avons regroupées.

La mise en place des matériaux

Les coulées de La Confiance/Sainte Marguerite sont formées de la coalescence de 3 ensembles contemporains : des coulées en provenance de la Plaine des Palmistes, des coulées issues du Piton Armand et des coulées sorties aux Puys de l'Etang (peut-être les plus récentes). Il y a une imbrication de coulées «aa» (à gratons) et de coulées «pahoehoe» (en dalle). En aval, vers Saint Benoit, ces coulées de phase IV se sont appuyées sur un ancien cône alluvial à galets (en cours de ferrallitisation) issu de la Rivière des Marsouins.

Le nappage de coulées ne paraît pas très épais (une dizaine de mètres au maximum). Au nord immédiat du Piton Armand, une «fenêtre» laisse apparaître des sols sur cendres plus épaisses (unité 47). Les pentes générales sont faibles (5 à 10 %) mais coupées de ressauts d'empilements des coulées successives.

Les coulées qui descendent de la Plaine des Cafres, sur des pentes plus fortes (10 à 15 %), sont quasi exclusivement de type «aa», à très nombreux bourrelets, bossèlements et ressauts rocheux. Ces laves ont été émises par des fissures ouvertes entre la Fournaise et le Piton des Neiges. Des centres de sorties sont marqués par un grand nombre de cônes de scories perçant les Hauts de la Plaine des Cafres (Piton Manuel, Piton Dugain, Piton Villers, Piton Desforges, Piton Samuel...). De nombreux cônes, moins hauts, ont été enfouis sous des coulées postérieures.

Après la mise en place des coulées de la phase IV, la Fournaise a continué à émettre des projections cendreuses dont l'épaisseur, sur ces coulées n'est jamais supérieure à 50 cm. Ces cendres ont subi des redistributions diverses par les eaux, en fonction du modelé de détail (rabotage sur les bosses, piégeage dans les creux).

Le modelé

La mésotopographie est accidentée et reflète, comme toujours, la dynamique de mise en place des coulées empilées les unes sur les autres, avec leurs débits, viscosités et directions différents.

Les pentes locales fortes (20 à 40 %) et blocailleuses sur 2 à 6 mètres de dénivellation, ont ainsi pour origines : les bordures frontales ou latérales des coulées, les boursouflures dues à des épaississements de la lave, les flancs (internes ou externes) des levées bordant les écoulements rapides, des effondrements de tunnels de lave.

Le réseau hydrographique est peu enfoncé du fait de la jeunesse et de l'absence d'altération du substrat. Son tracé emprunte à l'origine les gouttières-intercoulées et les chenaux de coulées. Les ravines principales (Ravine Sèche et Ravine des Cabris au sud ouest) n'entaillent les basaltes que sur quelques mètres. Leurs profils longitudinaux sont en marches d'escaliers, alternant biefs, petits escarpements et marmites de surcreusements. Les lits sont rocheux, peu encombrés de galets.

Les sols

Les sols sont hétérogènes car constitués de 2 matériaux côte à côte ou superposés :

- le basalte scoriacé légèrement altéré (pédogenèse «brunifiante andique»),
- les placages cendreux de 10 à 50 cm d'épaisseur (pédogenèse «andique désaturée»).

Les deux sources d'hétérogénéité des sols sont, d'une part, l'épaisseur très variable ou l'inexistance des cendres (ceci doit être en relation avec le meso-modelé), d'autre part l'état de fragmentation de la lave (taille des gratons, présence ou absence de dalle). A l'échelle du 1/50 000, il n'y a pas de déterminisme repérable (lois de répartition) permettant de cartographier ces 2 paramètres, qui changent tous les 10 mètres, indépendamment l'un de l'autre.

En règle générale sur les pentes faibles (moins de 10 %), les placages de cendres sont les plus nombreux, mais un peu partout des chicots de lave scoriacée affleurent.

Au contraire, sur les pentes supérieures à 10 % et sur les ressauts, ce sont les affleurements qui dominent, parsemés de rares poches cendreuses.

– Sur laves scoriacées, les sols sont caillouteux sur toute leur épaisseur et surtout, leur répartition est très hétérogène. Ces cailloux caverneux ne présentent qu'une fine altération superficielle brun-jaunâtre à ocre. L'intérieur, très dur, n'est pas touché. Entre les cailloux se trouve une matrice limono-argilo-gravillonnaire brun-grisâtre à brun-jaunâtre, riche en matière organique (20 à 25 % en surface sur 20 cm, 5 à 8 % jusqu'à 50 cm). Ce matériau terreux pénètre en langues jusque vers 80 cm de profondeur. Il est très meuble et laisse beaucoup de vides entre les gratons de toutes tailles.
  Ces sols sont acides : pH-eau = 4,3 à 4,5 en surface, 5,2 à 5,5 en profondeur. Le pH-KCI en B, de l'ordre de 5,3 à 5,8 est souvent supérieur au pH-eau, ce qui signale le caractère andique de l'altération. Le pH-NaF est de l'ordre de 9,5 à 10 en surface et 10 à 10,5 en profondeur. La capacité d'échange cationique (CEC) au pH du sol est faible (4 à 8 mé/100 g) ; le complexe est désaturé (V = 10 à 30 %). En surface, il y a 1 à 3 mé/100 g d'aluminium échangeable, 0,5 à 1 mé en profondeur.
  Aucune détermination minéralogique n'a pour l'instant été réalisée dans ces altérations ; on peut cependant s'attendre à un mélange d'allophanes, halloysite, hydroxydes amorphes de fer et d'alumine, de minéraux primaires (olivine, pyroxène, plagioclases).
  Compte tenu de leur faible épaisseur, de leur forte pierrosité et de la jeunesse de leur altération, ces sols sont à ranger soit dans les «andosols peu différenciés», désaturés et acides, soit dans les «sols bruns andiques» acides.
– Sur placages cendreux : la couche de cendres résiduelles altérées de couleur brune est de 20 à 50 cm. Elle présente des caractères andiques marqués : toucher onctueux et limoneux, absence de plasticité, densité apparente de 0,4 à 0,5, grande richesse en eau (150 à 250 % d'humidité pondérale), thixotropie en profondeur, richesse en matière organique non noircissante (20 % en surface, 7 à 12 % en dessous) avec un rapport C/N élevé (14 à 20). En dessous de 400 mètres (NE), le pH-eau est de 5 à 5,1 en surface, de 5,3 à 5,4 en profondeur. Le taux d'aluminium échangeable est alors faible (moins de 0,5 mé en surface).
  Vers la Plaine des Cafres, entre 800 et 1 300 mètres d'altitude, les pH sont plus bas (pH-eau = 4,5 à 4,9 en surface, 4,6 à 5,0 en dessous). Le taux d'aluminium échangeable est alors assez élevé (1 à 2 mé/100 g en surface). A 30 cm, le pH-KCI est toujours supérieur au pH-eau de 0,5 à 0,7 unité. Le «test au NaF» est toujours positif en profondeur : le pH-NaF est compris entre 9,8 et 10,2.
  A faible altitude (La Confiance, Sainte Marguerite), les andosols sur basalte paraissent donc plus acides que les andosols sur cendres. Les premiers sont dominants en surperficie.
  A moyenne altitude (du quatorzième au dix-neuvième), les pH sont aussi bas sur cendres que sur basalte. Les andosols sur cendres paraissent alors dominer par rapport aux sols sur basalte.

Qualités agronomiques

Il faut distinguer les régions de basse altitude du nord-est (La Confiance, Sainte Marguerite) des régions de moyenne altitude du sud-ouest (entre le Tampon et la Plaine des Cafres).

– Le nord-est
  Il s'agit de la zone sucrière occupée par des petits planteurs (moins de 3 ha). La production est livrée à l'usine de Beaufonds (près de Saint Benoît). Les conditions d'exploitation de la canne sont difficiles. La zone est excessivement blocailleuse et, bien que la pente générale soit faible, elle est coupée de très nombreux ressauts qui gênent fortement la mécanisation. Les opérations de dessouchage, de plantation, d'entretien et de chargement ne sont mécanisées que sur une partie de la surface (50 % ?). La coupe

mécanisée n'est pas possible. Pour toutes ces raisons, les cannes donnent des repousses bien au-delà de 10 ans et la productivité sucrière de cette région est faible. La main-d'oeuvre nécessaire à la coupe est importante et de plus en plus difficile à trouver. En fait, c'est plus la vanille en intercalaire de cannes, sur tuteurs (Dracaena), qui valorise souvent les parcelles peu productives en canne.

Ces sols, très irréguliers, le plus souvent peu épais, sont très acides (pH 4,5 en surface). Les carences sont fortes en phosphore, potassium et calcium. Le chaulage est indispensable avant toute chose, afin de réduire la toxicité aluminique et les désordres nutritionnels.

On ne peut envisager dans cette zone qu'une «diversification extensive» faiblement mécanisée pouvant associer :

- canne/vanille sur tuteur,
- arboriculture (litchis, agrumes, giroflier...),
- maïs - haricots,
- prairies.

Le climat très humide (pluviosité 4 000 à 5 000 mm) favorise maladies et le parasitisme, ainsi que la prolifération des adventices. D'autre part, il y a une exposition marquée aux vents cycloniques occasionnant des risques pour l'arboriculture et pour le maïs.

– Le sud-ouest

On est ici au-dessus de la zone canne. Les contraintes «sols» sont identiques à celles de la région précédente, à savoir : forte pierrosité, bordures de coulées indéroctables soulignées par de nombreux ressauts malgré des pentes générales faibles, inférieures à 12 % ; sols peu épais à grande variabilité spatiale. Les sols sont cependant globalement un peu moins acides (pH 5 en surface), mais nécessitent encore des chaulages.

C'est actuellement un secteur de polyculture très diversifié : cultures vivrières (maïs, pomme de terre, haricot), cultures maraîchères, géranium, arboriculture (pêchers), prairies. S'y mêlent de vieilles jachères à boisements d' Acacia decurrens. L'emprise urbaine (agglomérations, villégiatures avec jardins) est importante.

7.4.7 Les zones de haute altitude (unités 55 à. 58)

Nous abordons maintenant les «Hautes Plaines» proprement dites : Plaine des Cafres (jusqu'à 1 700 mètres) et Plaine des Palmistes (jusqu'à 1 300 mètres).

Les placages cendreux (tout en étant toujours inférieurs à 50 cm) sont plus systématiques, alors que l'altération du basalte y est pratiquement inexistante.

La pluviométrie est comprise entre 1 800 et 3 200 mm dans la Plaine des Cafres, entre 4 000 et 5 000 mm dans la Plaine des Palmistes. Sur cendres, les sols seront donc toujours des andosols désaturés perhydratés.

Les subdivisions introduites dans cet ensemble de 4 000 hectares concernent la nature des coulées basaltiques :

- les coulées de type «aa» dominant (unités 55 et 56) ; superficie = 2 200 hectares.
- les coulées de type «pahoehoe» dominant (unité 57) ; superficie = 1 700 hectares.
- les coulées à grosses boursouflures rapprochées (unité 58) ; superficie = 120 hectares (Plaine des Cafres).

Dans la Plaine des Cafres, toutes ces coulées d'origine fissurale ou centrale ont été émises dans la «zone des Pitons». Ces édifices de scories sont très nombreux (une trentaine pour la phase IV), souvent emboîtés ou greffés les uns sur les autres et de tailles diverses (certains, en partie ennoyés) ; les plus importants sont les Pitons Manuel, David, Sales, Desforges, Villers, Samuel, Dugain, Mare à Boue, Bory. Une partie de ces laves s'est dirigée vers le sud-ouest (Le Tampon, Saint Pierre) en épargnant des terrains plus anciens (à cendres plus épaisses) formant ainsi des «fenêtres» en lanières. Une autre partie s'est dirigée vers la Plaine des Palmistes en

dévalant l'escarpement de la Grande Montée, actuellement moulée et scellée en partie par ces nappages. A ces coulées déversantes se sont jointes dans la Plaine des Palmistes des coulées fissurales (pahoehoe) et des coulées «aa» sorties, en amont de la plaine, du gros Piton des Songes, l'ensemble se dirigeant vers le nord est, jusqu'à la mer (Sainte Anne, Saint François). Les coulées ont isolé une série de petites plaines dépressionnaires plus ou moins endoréïques, postérieurement remblayées et aplanies par des matériaux d'épandage alluvial d'origine cendreuse (voir plus loin, unité 87).

Les coulées «aa» dominantes (unités 55 et 56)

Globalement, c'est le sous-ensemble le plus important (photos A.48 et A.49). Ces coulées sont majoritaires dans la Plaine des Cafres (1 500 hectares), minoritaires dans la Plaine des Palmistes (700 hectares), par rapport aux coulées «pahoehoe» en dalles.

Les pentes générales sont inférieures à 10 %, le plus souvent même à 5%, ce qui pose des problèmes de drainage (particulièrement dans la Plaine des Palmistes). Seule la montée vers la Plaine des Palmistes, en aval de celle-ci, entre 450 et 700 mètres d'altitude, présente des pentes fortes, supérieures à 20 % (unité 56). Ces pentes sont couvertes d'un fourré haut à goyaviers.

L'utilisation agricole dominante de cette unité de milieu est la prairie d'élevage : élevage bovin laitier à la Plaine des Palmistes, élevage bovin (naisseur et laitier) et ovin dans la Plaine des Cafres.

Dans la Plaine des Palmistes, les pâturages sont en majeure partie fauchés pour l'affourragement à l'étable (kikuyu, graminées tempérées). Dans la Plaine des Cafres, les prairies, plus ou moins enrichies en kikuyu, servent de parcours ou sont fauchées (graminées tempérées). Il y a aussi de vastes pâturages naturels à moutons (Coteau de Brèdes, Piton Samuel), piquetés d'ajoncs, de joncs et de quelques «branles». De gros tamarins, reliques de la végétation naturelle d'origine, y susbistent.

Le modelé du paysage est constitué de bossellements d'assez faible amplitude (2 à 3 mètres) dus à la dynamique de mise en place des laves. Des ressauts plus pentus et rocheux signalent les fronts et bordures de coulées à gros blocs scoriacés et dalles disloquées. Sur cette topographie, les cendres aériennes se sont déposées et ont été redistribuées irrégulièrement, formant actuellement une couche d'épaisseur moyenne inférieure à 50 cm, au travers de laquelle pointent les protubérances rocailleuses des coulées «aa». On peut trouver exceptionnellement, dans des creux, un mètre de cendres remaniées piégées. A l'aval de la Plaine des Palmistes, les coulées qui ont dévalé sur des pentes fortes (unité 56) ont formé un modelé plus accidenté, à ondulations plus serrées et plus hautes, sous lesquelles il y a de nombreux tunnels de lave.

Les sols

- L'horizon de surface (10/15 cm), brun gris foncé, est feutré de racines (graminées). Il est très riche en matière organique (20 %). Le rapport C/N est élevé (15 à 18). Le pH est très acide, surtout dans la Plaine des Cafres (pH-eau = 4,0 à 4,5; pH-KCI = 4,2 à 4,5). Le taux d'aluminium échangeable est fort (3 à 5 mé/100 g).
- En profondeur, le sol est brun foncé, encore riche en matière organique (8 à 12 %). Il présente les caractéristiques physiques habituelles des andosols perhydratés : très forte humidité constante (150 à 250 % d'humidité pondérale), toucher onctueux et «limoneux», structure continue, faible densité apparente (0,5 en moyenne), thixotropie nette. Le pH est acide : pH-eau = 4,5 à 4,7 ; pH-KCI = 5,9 à 5,3. La teneur en aluminium échangeable (AI+++) est de l'ordre de 1 à 2 mé/100 g. La capacité d'échange cationique est très faible (4 à 6 mé/100 g). Le complexe est désaturé (V = 15 à 25 %).

Immédiatement sous les cendres, les blocs de la coulée sous-jacente sont souvent «rougis» en surface, par l'action agressive et solubilisante pour le fer, des acides fulviques, signalant un début de podzolisation. En dehors de cela les blocs scoriacés ne présentent pas d'altération.

Il faut signaler d'autre part qu'au sein des coulées «aa» de la Plaine des Palmistes existe une proportion assez importante de coulées en dalle qui sont la cause d'un drainage déficient, rappelant l'unité suivante.

Aptitudes

Les sols sont peu épais. Les blocs de gratons émergent un peu partout. La variabilité spatiale est importante avec alternance rapide de poches de cendres (10 à 30 cm) et d'affleurements.

Une autre contrainte est ici l'extrême acidité des sols (pH inférieurs à 4,5 en surface) et la teneur élevée en aluminium échangeable, source de toxicité et de déséquilibres nutritionnels pour les plantes.

Un facteur intéressant est la topographie ; les pentes sont généralement faibles. La «vocation» de ces hautes plaines est la prairie d'élevage (pâturage ou fauche) en kikuyu, graminées et légumineuses «tempérées».

Le chaulage est naturellement indispensable. La nitrification étant très ralentie à ces altitudes, il faudra amener des doses importantes d'azote, spécialement sur les graminées (fétuque, dactyle, ray-grass...).

Les difficultés d'implantation et d'entretien des prairies dans ces types de milieu ont déjà été évoquées (Chap. 6) : défrichement, préparation du sol, semis, parfois drainage, rotation des animaux, adventices...

En zone pierreuse, comme ici, l'exploitation en fauche est conditionnée par un épierrage parfait de la parcelle. En pratique, la fauche ne devrait être réservée qu'aux sols épais et peu pierreux (unités 47 et 87). Ici, le pâturage est plus adapté.

Les coulées «pahoehoe» (en dalles) dominantes (Unité 57)

Les pentes les plus faibles (moins de 5%) sont souvent nappées de coulées «pahoehoe» très fluides (dégazées) en dalles peu basculées, sur lesquelles les placages cendreux ont colmaté les fissures. Ces zones sont ainsi rendues imperméables. Cette imperméabilisation est renforcée par la formation d'un niveau ferrugineux aliotique entre les cendres et la coulée. Il se crée ainsi une nappe perchée qui engorge les sols en permanence.

C'est dans la Plaine des Palmistes que ce type de milieu est le plus typique et le plus étendu, spécialement dans toute sa moitié aval entre 700 et 1 000 mètres d'altitude (1 200 hectares). Dans la Plaine des Cafres (450 hectares) on le trouve au Coteau de Brèdes et à la Savane Mare à Boue. Dans la Plaine des Palmistes, on observe à ces endroits une végétation particulière : un fourré très hygrophyle d'où émerge (moins de 3 mètres de -haut) Pandanus montanus («vacois»), dont les racines-échasses plongent dans le matériau engorgé, parfois inondé. Aux endroits où la nappe est subaffleurante , les débris végétaux se décomposent mal et s'accumulent en «hydromor» spongieux et fibreux. Sur ce substrat organo-minéral se développe une strate basse enchevêtrée (photo A.50) à base de Philippia arborescens (bruyère), Geniostoma angustifolium («bois de rat»), Psiadia boivini («bois de tabac»), Senecio ambavilla («ambaville»), Helichrysum («velours blanc»), Machaerina iridifolia («herbe sabre»), Typha angustifolia (jonc), Cyperus rotundus («oumine»), Cyclosorus interruptus (fougère aquatique).

Sous le niveau organique, se trouve le matériau cendreux beige clair à grisâtre de 10 à 50 cm d'épaisseur (100 cm dans certaines poches) gorgé d'eau. Enfin à la base, la croûte ferrugineuse aliotique de quelques centimètres d'épaisseur colmate les fissures des coulées en dalle.

Les sols sont des andosols désaturés perhydratés hydromorphes. Le degré d'hydromorphie est variable suivant la profondeur du plan d'eau (entre 0 et 50 cm). Même avec des pentes sensibles, la nappe perchée ne s'écoule pas, faute de perméabilité latérale. Ces sols montrent une thixotropie très marquée et une faible portance. On y a mesuré des teneurs en eau pondérale supérieures à 300 %. Leur densité apparente est inférieure à 0,4.

Les coulées à grosses boursouflures (unité 58)

Ce type de milieu est particulier à la Plaine des Cafres où il ne représente que 120 hectares.

Il s'agit de champs, bien circonscrits, de laves scoriacées à topographie extrêmement chaotique, constitués de «monticules» très rapprochés (sans cratères sommitaux), de 2 à 10 mètres de haut. Ces boursouflures sont constituées de blocs scoriacés de toutes tailles, parfois soudés. Des placages de cendres venues par la suite existent dans les creux.

Ces champs «boursouflés» sont situés aux pieds de quelques gros cônes de scories. Nous pensons qu'une telle morphologie est due à l'arrivée des laves dans des plans d'eau peu profonds. La vaporisation de l'eau sous-jacente entraîne des surpressions basales qui crêvent, boursouflent et refragmentent localement les coulées, y créant ces multiples pustules d'accumulation scoriacée secondaire. En même temps, le refroidissement plus rapide des coulées freine leur progression, ce qui explique leur faible trajet (moins de 1 km) autour des cônes principaux de sortie. C'est le seul endroit à la Réunion où l'on peut voir un tel faciès de coulée, sans doute à cause de la quasi-platitude du modelé favorable à l'isolement par des coulées de directions différentes, de dépressions marécageuses, elles- mêmes sièges d'éruptions ultérieures.

Ces zones très accidentées, à rares poches de cendres sont inutilisables pour l'agriculture.

Certains cônes de scories ont émis de grandes quantités de lapilli, matelassant leurs environs sur des épaisseurs suffisantes (jusqu'à 2 mètres), pour marquer de façon spécifique le milieu (sols meubles, très filtrants, érodibles), malgré les différences existant par ailleurs, concernant en particulier l'âge, l'altitude et les pentes.

7.5 Les recouvrements de lapilli unités 59 à 61

Les lapilli sont des laves basaltiques finement fragmentées, éjectées en puissantes «fontaines de laves» autour des cônes (lieux d'émission) euxmêmes bâtis par les retombées scoriacées les plus grossières.

Le matériau est toujours composé de petits éléments de 0,5 à 2 cm de large, non soudés, truffés de fines vacuoles leur conférant un faciès ponceux. Le basalte est le plus souvent vitreux malgré la présence de quelques phénocristaux de pyroxène et d'olivine. Suivant l'état d'oxydation et d'hydratation du fer, les lapilli sont noirâtres, jaunes ou rouges. La teinte jaune, caractéristique des hautes altitudes, est attribuée au processus de «palagonitisation», sans que l'on sache s'il s'agit d'une action météorique donc post-dépôt, ou bien d'une action de la vapeur d'eau sur le verre basaltique en cours d'éjection (phréato-magmatisme).

Les lapilli se stratifient en retombant mais la litation peut aussi avoir pour origine la reprise (aisée) par les eaux de ruissellement.

Nous ne parlerons pas ici des champs de lapilli des landes de très haute altitude, que nous avons déjà étudiés (unité 3).

En dehors de ces zones sommitales, les champs de lapilli, autour des cônes de scories, sont répartis en deux grands ensembles :

- ceux de basse et moyenne altitude,
- ceux de haute altitude.

7.5.1 Les lapilli de basse et moyenne altitude (unité 59)

Il s'agit essentiellement des nappes pyroclastiques situées autour des cônes de scories de la phase IV, qui se succèdent, au sud, entre Montvert et Vincendo.

La plupart de ces cônes, en plus d'une phase effusive (unités 51, 52, 53) ont eu une activité explosive sous la forme de hautes fontaines de laves finement fragmentées retombant et s'étalant en périphérie. Nous pouvons assimiler à cet ensemble les lapilli du Piton Moka près de Piton Sainte Rose et ceux de Piton Armand.

Ces champs de lapilli forment une étendue globale de 800 hectares. Leur épaisseur, liée à l'éloignement du cône d'origine, est de 50 cm à 2 mètres. Les projections ont moulé, en l'adoucissant, le modelé antérieur. Les pentes, faibles, sont inférieures à 15 %. La plupart de ces zones sont cultivées en canne à sucre. Les cultures maraîchères (ail...) occupent aussi une place importante, entre Petite île et Saint Joseph (photo A.45).

Les sols sont formés sur un matériau vitreux meuble (les lapilli ne sont pas soudés) léger (finement poreux), très filtrant.

L'âge de ces formations pyroclastiques est d'environ 10 000 ans (phase IV). La pluviométrie est de 1 500 mm (Montvert) à 3 000 mm (Vincendo) et la température moyenne est de 23 ° C. Sous ces conditions, l'altération n'a pas digéré totalement les lapilli : leur forme originelle est souvent conservée mais ils s'écrasent assez aisément entre les doigts (couleur rouge sombre). La couleur d'ensemble de ces sols est brun rougeâtre, plus sombre en surface. La structure est continue (absence de fentes).

L'horizon de surface, de 20 cm d'épaisseur, est brun rougeâtre foncé, très friable, fortement colonisé par les racines fines (canne), moyennement gravillonnaire, à matrice limono-argileuse brun très foncé, riche en matière organique. Le taux global de matière organique est de 4 à 8 % (C/N = 10 à 11 sous canne à sucre). Le pH-eau est proche de la neutralité (6,5 à 7). La capacité d'échange est élevée (jusqu'à 35 mé/100 g) et assez saturée (V = 60 à 80 %).

En profondeur, le matériau est brun rougeâtre, avec des langues plus sombres et plus organiques ; il est toujours humide, particulièrement friable et montre de nombreuses racines. Le taux moyen de matière organique est de 4 % (vers 30 cm) à 2 % (vers 60 cm). Le C/N est de l'ordre de 12 à 13. Le pH-eau est de 6 à 7 (pH-KCI = 5,8 à 6,2). La capacité d'échange cationique au pH du sol est de 20 à 30 mé/100 g. La saturation est de 60 à 70 % avec 10 à 15 mé de calcium et 8 à 10 mé de magnésium.

Ces sols ont donc de bonnes propriétés physico-chimiques. Ils ne sont pas acides contrairement aux sols sur cendres. Par rapport à ces derniers, les sols sur lapilli sont encore riches en bases échangeables, malgré la forte pluviométrie et le drainage rapide, ce qui semble indiquer que l'altération hydrolytique du verre basaltique n'est pas terminée. L'inconvénient de ces sols est leur sensibilité à l'érosion (faible stabilité structurale).

Dans le «référentiel» pédologique français (en cours d'élaboration), ces sols appartiennent aux andosols vitriques chromiques.

Ces sols sur lapilli sont très intéressants pour l'agriculture ; d'abord chimiquement : de par leur faible acidité (pH supérieur à 6) et leur forte capacité d'échange, ils permettent une bonne assimilation des éléments minéraux apportés sans que le chaulage soit nécessaire. Le caractère «andique» est ici peu contraignant - contrairement aux andosols sur cendres - sur la nitrification et la rétention en phosphore. Ces caractères sont bien perçus par les agriculteurs de la région de Petite Ile/Manapany, qui reconnaissent à ces sols des qualités supérieures à celles des sols environnants.

Par ailleurs, ce sont des sols très filtrants, profonds, sans cailloux et faciles à travailler, spécialement prisés pour les cultures maraîchères. Ils paraissent avoir une bonne capacité de rétention en eau. Toutes les cultures sont ici possibles. Actuellement une partie est en canne à sucre et une partie en vivrier/maraîcher parfois arboriculture. La zone de Petite Ile peut, en dessous de 200 mètres d'altitude, bénéficier d'une irrigation d'appoint du Bras de La Plaine. Ailleurs, l'irrigation n'est pas nécessaire.

Ces sols demandent à être travaillés et cultivés avec précautions car ils sont, malgré leur perméabilité, sensibles à l'érosion (structure fragile) lorsque les pentes dépassent 5 %.

7.5.2 Les lapilli de haute altitude (unités 60 et 61)

Il s'agit du prolongement aval des vastes champs de projections récentes (moins de 2 000 ans probablement) des landes à éricacées situées au-dessus de 2 000 mètres (Revers du Rempart des Sables et du Rempart de Bellecombe). Les deux zones où les recouvrements sont les plus épais sont :

- la partie nord-aval du Nez de Boeuf, entre 1 800 et 2 000 mètres d'attitude, d'une superficie de 175 hectares en pâturages extensifs et forêt claire à Sophora denudata («petit tamarin des Hauts»). Les pentes y sont de l'ordre de 15 %.
- le fond de la Rivière de l'Est et le revers aval du Rempart de Bellecombe, entre 1 750 et 2 100 mètres d'altitude, d'une superficie de 950 hectares. Une partie, dans le fond de la dépression (Savane Cimetière), est à pentes très faibles (moins de 5 %) et couverte de pâturages extensifs. L'autre partie (unité 61) est en pentes fortes (15 à 30 %) et occupée par une forêt de Tamarins (Acacia heterophylla).

Il est probable que des champs de lapilli (non représentés sur la carte) existent également entre 1 800 et 2 000 mètres d'attitude, dans les Hauts de Piton Armand (entre la Plaine des Palmistes et la Rivière de l'Est). Ceci, en raison de l'abondance de cônes de scories en amont immédiat de cette bande.

Caractères généraux des sols

Ce sont des sols de couleur sombre (brun très foncé à l'état sec, noirâtre à l'état humide) sur au moins 50 cm d'épaisseur, brun-jaunâtre à langues plus sombres en profondeur. Les lapilli, peu altérés, sont enrobés de matière organique noirâtre. Le matériau est donc gravillonnaire très léger. La densité apparente est d'environ 0,5. La consistance est très friable ; il est difficile de prélever un échantillon sans qu'il se délite.

Le sol est toujours très humide. Les racines sont nombreuses et peuvent descendre profondément.

De 0 à 50 cm, le sol est très riche en matière organique (20 à 25 %), à rapport C/N élevé (15 à 20). Le pH n'est pas très acide : pH-eau = 6 à 6,3, pH-KCI = 5,3 à 5,5. La capacité d'échange cationique est relativement élevée (15 à 18 mé/100 g). Le complexe absorbant est presque saturé (V = 70 à 90 %).

Ces matériaux vitreux jeunes subissent une hydrolyse de faible intensité. Ils sont encore un réservoir de bases (calcium, magnésium) qui, libérées lentement, tamponnent l'action acifidiante des acides fulviques migrant en profondeur et s'associant étroitement aux minéraux allophaniques en cours de synthèse.

Ces sols peuvent se classer dans les andosols vitriques mélaniques.

7.6 Les coulées récentes unités 62 et 63)

Les «coulées récentes» (dans le sens géologique du terme) se situent au nord et au sud de la caldera actuelle et du Grand Brûlé (Enclos), c'est-à-dire entre les remparts de Basse Vallée et du Tremblet d'une part, entre les remparts de la Ravine Constantin et de Bois Blanc d'autre part. Cette zone appartient à la région la plus humide de l'île, avec 3 500 à 6 000 mm de pluies annuelles.

Ce vaste remplissage «anté-enclos» pourrait dater de 8 000 à 5 000 ans (les coulées de moins de 5 000 ans, «post-enclos», seront qualifiées de sub- actuelles et d'actuelles).

La caldera de cette époque (témoin : Rempart des Sables), avec sa structure d'effondrement-glissement ouverte à presque 90 ° sur la mer, était donc beaucoup plus vaste que l'actuelle qui s'y est emboîtée (Enclos Fouqué/Grandes Pentes/Grand Brûlé). Bien que le volcanisme actuel/sub-actuel (unités 64 et 65) soit essentiellement localisé dans cette dernière structure, nombre de ses coulées sont sorties (et sortent encore) à l'extérieur,

venant ainsi recouvrir une partie du volcanisme récent. Les deux volcanismes, très semblables, sont donc imbriqués de façon complexe. Dans la région de Bois Blanc le «subactuel» paraît l'emporter sur le «récent» (P. BACHELERY, 1981). C'est l'inverse pour la région de BasseVallée/Saint Philippe/Le Tremblet.

Les critères habituels, qu'ils soient d'ordre morphologique (dissection, émoussé des cônes...), lithologique (faciès des basaltes, épaisseur de recouvrement cendreux), botanique ou pédologique, ne sont pas discriminants pour distinguer clairement les coulées «anté-enclos» de celles «post-enclos». D'autre part l'accessibilité de ces terrains est extrêmement difficile. Il s'agit dans les 2 cas de basaltes inaltérés sans placages cendreux et non retouchés par la dissection.

A basse altitude, le critère «fragmentation racinaire des gratons» avec légère accumulation organique (permettant une certaine utilisation agricole) est le seul élément utilisable pour distinguer les coulées récentes des coulées subactuelles.

Sur la côte, seule les coulées récentes entre Le Baril et l'Îlet aux Palmistes, en dessous de 300 mètres d'altitude, permettent, avec difficulté, de cultiver de la canne à sucre.

Dans presque toute la bande située en dessous de 600-650 mètres d'altitude, la végétation forestière naturelle autochtone (forêt hygrophile mégatherme) a été éliminée. Elle a été remplacée jusqu'à 150-370 mètres sur les coulées récentes par la culture de la canne. C'est également la région de la vanille sur tuteur (vacois, filao, goyavier). L'ONFA.3 a pratiqué quelques reboisements en exotiques (Cryptomeria et camphrier à Basse Vallée) et régénérations d'indigènes («Petit Natte» et «Grand Natte»). il existe une réserve naturelle à Mare Longue, rare témoin de la forêt mégatherme de basse altitude.

Tout ce qui est situé au-dessus de 600 mètres, encore intact (forêt hygrophile mégatherme puis mésotherme) est classé en réserve biologique domaniale (Fig. 4.4).

Le modelé général de ces grands panneaux présente un profil classique «poly concavo-convexe» de flanc de bouclier affecté de vastes glissements d'ensemble : des pentes faibles (moins de 15 %) sur la bande littorale, de 0,5 à 1,5 kilomètres de large (unité 62) ; puis une montée régulière des pentes, atteignant 40 à 50 % vers 1.900 mètres d'altitude. Après cette «ligne d'inflexion», une décroissance progressive pour arriver, à partir de 1 400 mètres, à nouveau sur des pentes inférieures à 15 %. Une nouvelle montée, jusqu'à 30-50 % de pente, s'observe de 1 600 à 1 700 mètres, avant d'arriver à la seconde convexité sommitale qui, à partir de 2 000 mètres concerne les landes à Philippia (unité 4).

La gouttière de Basse-Vallée correspond à une profonde entaille régressive du début de la phase 5 (8 000 ans?) qui a été moulée et fossilisée par les coulées récentes puis sub-actuelles qui s'y sont engouffrées (Brûlé du Baril).

Un certain nombre d'édifices de scories, en cônes ou bien en doubles lèvres continues de fissures, parsèment les grands versants. Les petits cônes sont souvent alignés sur des fissures. Ils sont très abondants en altitude, au dessus de 1 400 mètres (Puys Ramond), en dessous les sorties de laves étant généralement dégazées.

Le cheminement des laves fluides empilées les unes sur les autres strie les flancs du bouclier de chenaux et doubles bourrelets latéraux, visibles sur les photographies aériennes lorsque la végétation n'est pas trop dense (donc de mieux en mieux en altitude). Le réseau hydrographique commence à s'organiser en empruntant ces chenaux de lave, à peine surcreusés dans la moitié inférieure du panneau (en dessous de 800 mètres).

Sur versants à pentes supérieures à 15 %, les coulées «aa» (scoriacées) sont, comme toujours, affectées par des bossèlements serrés - à pentes locales supérieures à la pente générale.

La bande littorale est remblayée, pour une grande partie, en coulées «pahoehoe» dégazées très fluides (en dalles), sapées par la mer en une falaise d'une dizaine de mètres de haut. A son sommet, sur 10 à 30 mètres de large, la dalle fissurée est couverte par un «gazon bord de mer» (Zoizia tenuifolia). Au delà, se trouve un boisement à «vacois» (Pandanus purpurescens) et filaos (Casuarina equisetifolia).

7.6.1 Les sols

L'altération hydrolytique est nulle. Le «sol» résulte d'une légère désagrégation, renforcée par l'action corrosive des acides organiques, sous l'effet des systèmes racinaires forestiers, précédés par une séquence pionnière : strates de lichen (Stereocaulon), puis de fougères, branles (Stoebe, Senecio, Philippia, Agauria), etc. (voir Chap. 4).

Après une litière peu épaisse, le sol se réduit à un horizon de 10 à 20 cm d'épaisseur, gris sombre à noirâtre, humide, composé de racines et débris organiques peu humifiés mélangés à des graviers et cailloutis anguleux scoriacés, souvent à revêtement jaunâtre. Il n'y a pratiquement pas de terre fine. Le pH de ce matériau est de 5,5 à 5,7 près du littoral pour descendre régulièrement jusqu'à 4,0-4,5 à 1.800 mètres d'altitude. En dessous, on passe à la coulée scoriacée brute dans laquelle s'insinuent quelques racines.

Dans les zones sommitales (1 700 à 1 800 mètres), des placages de lapilli (non marqués sur la carte) «améliorent» le substrat et permettent l'installation de forêts de Tamarins.

Ces sols ont de faibles potentialités agricoles. La canne ne peut être mécanisée. La vanille sous boisement (filaos, goyaviers...), peu exigeante, constitue une bonne valorisation. Au delà de la bande littorale, d'environ 1 kilomètre de large, où l'on peut faire un peu de canne, d'arboriculture et de vivrier, la forêt complexe hygrophile à «bois de couleur» devrait être préservée.

7.7 Les coulées sub-actuelles et actuelles (unités 64 à 67)

Ce sont toutes les coulées âgées de moins de 5 000 ans ; la plupart occupent l'«Enclos» : Piton de La Fournaise proprement dit, Enclos Fouqué, Plaine des Osmondes, Grandes Pentes, Grand Brûlé. Mais une partie est «hors Enclos» : Plaine des Sables (d'où une coulée a emprunté la Ravine Langevin jusqu'à la mer), Fond de la Rivière de l'Est, nombreux «brûlés» entre les Remparts de Basse Vallée et du Tremblet, et entre ceux de Bois Blanc et de la Ravine Constantin. Sur le panneau de Sainte Rose, deux éruptions historiques arrivant en mer sont connues : celle de Sainte Rose (1708) et celle de Piton Sainte Rose (1977).

Cependant la plupart des éruptions ont lieu dans l'Enclos Fouqué, au sud et surtout au nord des flancs de l'édifice central. Chaque éruption a souvent plusieurs sorties qui s'alignent le long de fractures en descendant d'amont en aval. Les sorties explosives y construisent alors une série de petits cônes de scories (photo A.66), parfois des «spatter-cônes» ou «spatter- remparts» constitués de projections de lambeaux de lave ressoudés. Les coulées elles-mêmes (coulée «aa» le plus souvent), fluides, s'étalent sur une épaisseur de 4 à 6 mètres puis dévalent vers la plaine des Osmondes, les Grandes Pentes ou le Grand Brûlé (photo A.65). Les «fleuves» de lave les plus fluides construisent des levées latérales au sein de la partie refroidie, striant ainsi les pentes.

Sur 15 ans, entre 1972 et 1987, on a répertorié à la Fournaise quasi exhaustivement 60 éruptions (L. STIELTJES, 1986). Les périodes sans éruptions ont des durées très variables, de moins de 2 mois à plus de 1 an. Les éruptions peuvent durer moins de 1 jour et certaines plus de 2 mois (la durée de 1 mois est fréquente). Le débit moyen des laves, toutes éruptions confondues, serait de 0,32 m3/s (P. BACHELERY, 1981).

D'après L. STIELTJES l'activité de la Fournaise pourrait être rythmée par des cycles de 15 à 30 ans et des «supercycles» de 100 à 300 ans, en relation avec les recharges des réservoirs magmatiques à différentes profondeurs (1 à 10 km) à partir du manteau d'alimentation (20 à 30 km).

P. BACHELERY (1981) a également insisté sur les phases explosives d'origine phréato-magmatique (cendres et lapilli) qui sont liées à la «recharge» des aquifères profonds traversés par le magma qui les vaporise, augmentant fortement les pressions. L'absence de cendres sur les coulées actuelles et subactuelles semble indiquer que ces phases explosives de grande ampleur sont beaucoup plus espacées que les phases à dominance effusive. Depuis l'éruption de 1860 (description de HUGOULIN) il n'y a plus eu de phénomènes phréato-magmatiques importants à la Fournaise.

7.7.1 L'édifice central (cône terminal)

Il correspond au Piton de la Fournaise proprement dit (2 632 mètres d'altitude). Le sommet, ayant environ 500 mètres de hauteur relative, est tronqué par 2 cratères à parois sub-verticales : le Bory à l'ouest, le Dolomieu à l'est (photo A.64). Ce dernier, le plus large, et dont une partie du plancher tend à s'effondrer, est actuellement le seul à avoir des éruptions terminales assez fréquentes (durée 1 mois en moyenne) a un endroit privilégié où se bâtit un petit cône scoriacé.

Les flancs du cône terminal, à pentes fortes (25-40 % à l'ouest, 40-50 % à l'est) sans aucune végétation, sont formés d'un empilement de laves, dont la plupart sont à surface lisse («en tripes») alimentées par des dykes affleurant en fissures émettrices radiales. Cependant des fissures transverses (non radiales), longues de 10 mètres à 1 kilomètre, zèbrent aussi les flancs ; de courtes coulées «aa» en sont sorties.

7.7.2 L'Enclos Fouqué

Il constitue la caldera actuelle sommitale proprement dite du bouclier de la Fournaise. Cette caldera est entourée d'un rempart sub-vertical en vaste arc de cercle de 100 à 300 mètres de haut, de 6 à 10 km de diamètre (photo A.64).

A l'est, cette caldera se prolonge et s'ouvre sur la mer en 2 remparts parallèles (remparts de Bois Blanc et du Tremblet). Le plancher de la caldera plonge alors de façon abrupte vers les Grandes Pentes et la Plaine des Osmondes.

La moitié ouest de l'Enclos Fouqué, remplie de laves cordées («pahoehoe»), présente un plancher sub-horizontal (pentes de 0 à 10 %). Ces pentes passent progressivement à 20 % vers l'est, avant la rupture de pente assez brutale qui fait plonger les laves vers le Grand Brûlé, passant alors au type «aa», scoriacé et chaotique.

Les laves de l'Enclos Fouqué ont été alimentées par de multiples dykes, radiaux par rapport au centre de l'édifice central, donnant des éruptions fissurales sur les flancs du cône.

7.7.3 Les Grandes Pentes et la Plaine des Osmondes

Situées en contrebas de l'Enclos Fouqué, en dessous de 1 600 à 1 900 mètres d'altitude, elles correspondent au basculement, à l'affaissement et au glissement de la caldera qui s'ouvre et plonge vers la mer.

Un témoin probable du rempart glissé et submergé de la caldera, est constitué par le chicot du «Piton de Crac» qui émerge des champs de laves.

Les Grandes Pentes (photo A.65) sont inclinées à 30-50 % (localement à 60%), sous forme d'arcs soulignant les vastes «loupes de glissement» vers la mer du flanc oriental du bouclier. Le plus profond et incurvé de ces arcs est constitué par le «pseudo rempart» moulé de laves et ancré sur le Piton de Crac entourant la Plaine des Osmondes, qui correspond elle-même à un replat étagé de l'affaissement-glissement latéral. Au moins deux autres axes de glissement plus rapides (formant des «rentrants») sont en train de s'initier, au centre et au sud.

Exception faite de l'amont de la Plaine des Osmondes où les fractures ouvertes étagées sont très visibles, ces processus morpho-tectoniques paraissent assez lents et continus, comparés à la cadence d'émission des laves. En effet les cicatrices de glissement et d'arrachement n'ont pas le temps d'«affleurer», étant très vite recouvertes et moulées par les coulées venant de plus haut. Les coulées ont d'ailleurs tendance à converger préférentiellement, en accélérant leurs débits, à l'amont de ces gouttières, là où les pentes sont les plus élevées.

C'est sur les Grandes Pentes que les chenaux et bourrelets de laves sont les plus nombreux. C'est à cet endroit en effet que les langues de laves se concentrent et dévalent à la plus grande vitesse en creusant leurs lits à levées latérales dans des gratons refroidis. Elles s'élargissent ensuite, en aval, pour s'étaler sur le Grand Brûlé.

Tous ces champs de lave, extrêmement chaotiques et «rugueux», (coulées «aa») sont très inhospitaliers, quasiment infranchissables à pied et encore plus dans le brouillard, fréquent. Il n'est pas recommandé d'y tenter l'aventure.

Les coulées («aa») vues de loin sont noires et nues pour celles de moins de 15 ans, blanchâtres (photo A.67) et couvertes d'un épais manchon (10 cm) de lichen héliophile (Stereocaulon vulcani) pour les récentes (10-30 ans). Ensuite apparaît une strate à Machaerina (cyperacée) et Blechnum (fougère).

Celles qui ont 30 à 200 ans sont déjà couvertes d'une strate arbustive discontinue à branles (Stoebe, Philippia), Senecio, Geniostoma, Agauria, Psiadia.

La fougère Blechnum tabulare, à port arbustif, est très caractéristique de ces étendues (La Plaine des «Osmondes» lui doit son nom.) Au-dessus de 800 mètres d'altitude, le fourré préforestier à espèces mésothermes pionnières ne commence à paraître qu'au bout de 200 ans. Sur les grandes pentes, le stade forestier n'est jamais atteint, contrairement aux coulées «hors enclos» (hauts de Saint Philippe).

7.7.4 Le Grand Brûlé

Le Grand Brûlé (photo A.65) est l'aboutissement de toutes les coulées qui dévalent de l'Enclos et des Grandes Pentes. Par rapport à ces dernières les pentes décroissent régulièrement depuis 30 % vers 600-700 mètres d'altitude, à moins de 5 % en bordure de mer.

Les coulées y perdent de leur vitesse en même temps que leur débit diminue par refroidissement. La plupart s'arrêtent avant la mer et on y trouve beaucoup de fronts de coulées, rendant la topographie extrêmement chaotique.

Les coulées sont colonisées par différents groupements végétaux suivant leur âge (T. CADET, 1980) :

- Les plus récentes (moins de 5 ans) ne possèdent que des revêtements de mousses et hépatiques.
- Celles qui ont entre 5 et 15 ans sont couvertes d'un lichen héliophile blanc épais (Stereocaulon vulcani).
- Entre 15 et 30 ans : sur le manteau de lichen qui remplit les interstices de débris organo-minéraux, s'installe une strate herbacée dont une fougère héliophile (Nephrolepis abrupta) et une grande cypéracée (Machaerina iridifolia) ; puis viennent des arbustes pionniers : Agauria salicifolia, Antirhea borbonica, Nuxia verticillata, Senecio ambavilla.
- Au-delà de 30 ans et jusqu'à 200 ans (?), la strate herbacée, très couvrante et haute, est envahie par la fougère Dicranopteris linearis, qui remplace progressivement la précédente (Nephrolepsis abrupta), alors que les arbustes, tels Agauria, grossissent. Quelques nouveaux arbres pionniers s'installent, en particulier Sideroxylon borbonicum.
- Au bout de 200 ans, on atteint le stade forestier (10/15 mètres) à Sideroxylon et Agauria auxquels s'ajoutent Nuxia, Antirhea, Aphloia, Molinaea, Doratoxylon, Polyscias, avec des épiphytes et une strate basse d'ombre à Nephrolepis biserrata.
- La forêt véritable climacique (qui peut apparaître vers 250/300 ans) est très rarement atteinte au Grand Brûlé : c'est la forêt à Sideroxylon, Labourdonnaisia, Xylopia, Mimusops.

En dessous de 200 mètres d'altitude, cette séquence temporelle est perturbée par l'envahissement très concurrentiel d'espèces secondaires à croissance rapide, en particulier le goyavier (Psidium caftleianum) et le filao (Casuarina equisetifolia). Le filao est un arbuste pionnier très efficace sur les coulées «aa».

7.7.5 Plaine des Sables, Hauts de la Rivière de l'Est

Entre le Rempart des Sables et le Rempart de Bellecombe, le volcanisme sub-actuel est à la fois effusif et explosif (phréato-magmatique). Le plancher de la deuxième caldera («caldera des Sables») s'est dédoublé en

s'effondrant au niveau du Fond de la Rivière de l'Est. La dénivellation entre les deux est d'environ 400 mètres à l'endroit de l'escarpement, lui-même moulé de laves sub-actuelles.

La Plaine des Sables est dominée par cinq gros édifices de scories : le Piton du Cirque, le Demi-Piton, le Piton Chisny, le Piton Rouge, le Piton Hubert. Le Demi-Piton est plus ancien que les autres, sub-actuels (P. BACHELERY, 1981). Ils ont émis des coulées fluides de type pahoehoe dominant, et beaucoup de lapilli riches en olivine, nappant en particulier la «Plaine des Sables» proprement dite, ainsi qu'une partie du Fond de la Rivière de l'Est.

Le plancher de la caldera est mangé au nord par le recul de la Rivière de l'Est et au sud par la Rivière Langevin. Par cette dernière s'est échappée une coulée sub-actuelle qui a dévalé jusqu'à la mer, construisant la Pointe Langevin.

7.7.6 Les coulées «hors caldera»

Ce sont essentiellement les sorties des Hauts de Saint Philippe, de Basse Vallée et de Bois-Blanc. Elles se superposent à des nappages plus «anciens» (antérieurs à 5 000 ans), de la phase 5, dans l'éventail de glissement de la deuxième caldera (Basse Vallée/Ravine Constantin). Exceptionnellement, des coulées peuvent sortir sur le panneau de Sainte Rose, par-dessus des coulées de phase III à recouvrement cendreux. Il s'agit des coulées de 1708 (Sainte Rose), de 1801 (Anse des Cascades) et de Piton Sainte Rose (1977) (photos A.68 et A.69).

Dans les Hauts de Saint Philippe, un grand volume de laves a emprunté la gouttière de Basse Vallée, à partir de la zone des Puys Ramond. En aval, ces coulées se sont étalées sur le «Brûlé du Baril». Les autres régions littorales de laves sub-actuelles sont : le Brûlé de Mare Longue (forte proportion de «pahoehoe»), le Brûlé de La Ravine Ango, le Brûlé de La Table, le Brûlé d'Elie et le Brûlé des Galets Citrons. Les dernières coulées en date sont celles de la Pointe de La Table et de Takamaka (1986).

En dehors des coulées contemporaines, la plupart de ces laves, même celles de 1776 à Takamaka, sont déjà couvertes d'une forêt hygrophile climacique à Labourdonnaisia. Seules les coulées de Citron Galet (1800), de Sainte Rose (1708) et de l'Anse des Cascades (1801) n'en sont qu'au stade Agauria - Sideroxylon - Dicranopteris (T. CADET, 1980).

Chapitre 8

LES UNITES DE MILIEU DES «CIRQUES» (unité 68 à 79)

Nous abordons maintenant les régions affectées parla morpho-tectonique récente de grande ampleur : essentiellement les «cirques» (Cilaos, Mafate, Salazie, Rivière des Pluies), mais également les plaines effondrées/glissées «externes» post-coulées (Tevelave, Entre-Deux, Grègues), les diverses masses glissées des grandes ravines (rivières des Roches, des Marsouins, du Bras de la Plaine, des Remparts, Langevin...) et des bas de remparts.

Tous ces ensembles sont constitués de matériaux détritiques issus d'un démantèlement total des coulées (et de leurs recouvrements cendreux). Nous n'y avons pas inclus la plaine des Makes et la plaine de Dos d'Ane, car leurs effondrements sont antérieurs au matelassage cendreux de la phase terminale du Piton des Neiges.

8.1 La formation des «cirques»

A la Réunion, les «cirques» (Mafate, Cilaos et Salazie) sont trois . gigantesques et grandioses excavations piriformes (ou sub-circulaires) coalescentes, d'une dizaine de kilomètres de diamètre, éventrant la partie centrale du massif du Piton des Neiges (Fig. 8.1). Ils sont entourés de parois sub-verticales («remparts») pouvant atteindre 800 à 1 000 mètres de dénivellation (photo A.58). Chaque cirque est ouvert sur la mer par un goulot profond et étroit par où sont évacués les produits d'érosion, avec construction, à l'aval (photo A.13), d'un vaste cône de déjection («alluvions à galets»). L'intérieur des cirques présente une morphologie de dissection extrêmement tourmentée, causée par une érosion régressive ravinante très intense, avec isolement de replats gauchis, plus ou moins inclinés, rognés par des «bad-lands» (photos A.62 et A.63). Ces plateaux résiduels irréguliers et diversement étagés sont appelés «ilets» à la Réunion.

De telles formes et processus d'érosion sont cependant connus ailleurs avec des dimensions inférieures et sur des matériaux divers (cf. par exemple les «lavaka» à Madagascar). Il faut pour cela qu'un certain nombre de conditions soient réunies, ce qui est le cas pour certains volcans- boucliers, particulièrement celui du Piton des Neiges. L'énergie potentielle de déblaiement d'une dénivellation ne s'actualise sous cette forme particulière d'amphithéâtre sommital à goulot évacuateur étroit que si la construction ou le modelé d'origine et les matériaux le constituant réunissent les deux conditions préalables suivantes :

- présence d'un profil concavo-convexe, à flancs en pentes fortes et plateau ou dôme sommital en pentes faibles,
- présence d'une couverture rigide apte au cisaillement brutal, d'épaisseur relativement régulière reposant sur un «coeur» de matériaux plus tendres facilement affouillable.

Dans de telles conditions, l'érosion progresse de l'aval vers l'amont (et de la périphérie vers le centre, pour un

dôme) suivant la séquence spatio-temporelle suivante :

- l'entaille remontante, initiée à partir du «niveau de base» aval, est, dans un premier temps, linéaire suivant la ligne de plus grande pente du modelé. La rigidité du matériau superficiel permet le maintien de parois sub-verticales et son déblaiement sans composantes latérales. L'appel au vide et l'effondrement par grands pans verticaux n'affectent que la tête de l'incision qui domine la pente générale du versant (photo A.30) et qui recule ainsi rapidement tant que cette pente reste élevée.
- lorsque le «trait de scie» atteint la rupture de pente qui marque le dôme ou plateau sommital, le processus de déblaiement dans le substrat profond tendre, d'unidirectionnel privilégié s'ouvre en éventail de façon centrifuge. L'affouillement multidirectionnel du matériau tendre provoque l'appel au vide, le cisaillement et l'effondrement brutal sous forme de larges arcs de cercle, de grands panneaux de la couverture rigide supérieure.

Plus le creusement en aval du goulot de sortie s'accentue, plus la dynamique de déblaiement rayonnant en amont s'accélère. Toutes les eaux et les produits d'érosion convergent et transitent par ce fin et profond exutoire qu'ils contribuent eux-mêmes à creuser. Ainsi l'excavation sommitale en «cirque» et le creusement linéaire de l'exutoire se font de plus en plus vite suivant des processus de rétro action positive.

A la Réunion, les conditions générales permettant cette dynamique sont particulièrement favorables. Les dimensions atteintes et les formes spectaculaires s'expliquent par des facteurs plus spécifiques.

1. La partie centrale profonde du Piton des Neiges est constituée de matériaux de la phase I («bouclier primitif»). Nous avons vu qu'il s'agit en majorité de «brèches primitives» et de coulées d'océanites très fortement altérées par hydrothermalisme (zéolites, chlorite, smectites...).
2. De plus, la partie sommitale du bouclier a subi une série d'effondrements volcano-tectoniques en calderas (au moins deux), consécutifs aux vides laissés dans les chambres magmatiques après les sorties des laves. Ces effondrements ont broyé et déconsolidé le coeur du bouclier affecté de multiples fractures à injections de laves postérieures (dykes, sills). Ces fractures, suivant leurs densités et directions, ont facilité et guidé le déblaiement.
3. Ces calderas, plus ou moins endoréiques, ont concentré les eaux météoriques particulièrement abondantes, qui se sont infiltrées en créant des réservoirs aquifères dans le réseau de fissures, contribuant ainsi à l'altération des roches des phases I et II. Le dôme sommital du bouclier, renforcé par sa dernière large caldera (probablement 10 à 15 km), avec ses matériaux profonds, était donc bien préparé à une excavation aisée de plusieurs côtés.

FIG. 8.1 – *Morphologie des cirques*

(.jpg)

4. Les océanites récentes non zéolitisées (phase II) et les coulées terminales des laves différenciées des phases III et IV, non altérées, ont formé la couverture stratoïde rigide nécessaire à l'érosion de type amphithéâtre escarpé. Ce chapeau peut avoir 500 à 800 mètres d'épaisseur au-dessus des formations tendres zéolitisées (phase I). Enfin les conditions cycloniques ont permis une accélération de l'érosion périphérique remontante, et ceci de trois côtés principaux. Du fait de la circularité du bouclier les têtes des cirques ont convergé, finissant par se recouper en fines crêtes (crête du Taibit, crête des Salazes...).
5. Les cirques ont non seulement creusé et largement déblayé la dernière caldera (dont les restes subsistent dans les «plaines» de Bélouve et des Marsouins), mais ils ont rayonné en dehors, éventrant une grande partie du dôme sommital du bouclier. Les remparts de cisaillement forment des lignes courbes qui se recoupent en «nez coupés» (Grand Bénard, Roche Ecrite, Be Massoune). L'édifice central principal de la dernière caldera, qui était un «strato-volcan», a lui-même été très largement entamé. Les restes en sont les deux sommets principaux de l'île : Piton des Neiges (3 070 mètres) et Gros Morne (2 991 mètres).
6. Le déblaiement dans les cirques a été plus ou moins guidé par la structure de fracturation du coeur du massif. L'érosion centrifuge a laissé subsister de multiples compartiments affaissés, glissés ou basculés, formés de matériaux détritiques disloqués de tous âges et lithologies, remaniant les matériaux des différentes phases successives. C'est l'origine des «îlets», replats bosselés, petits plateaux sub-horizontaux ou en plan inclinés et en gradins étagés. Des restes, non effondrés par la morphotectonique récente, subsistent dans Cilaos et Mafate, sous forme de rides cloisonnant ces cirques : crêtes de La Marianne, des Calumets, d'Aurère et des Orangers à Mafate, crêtes du Gueulé Rouge et des Fleurs Jaunes à Cilaos.
7. Concernant la «mise en place» et la répartition des résidus d'effondrement que sont les «îlets», certaines «lois» peuvent être tirées du mode de genèse centrifuge des cirques : les îlets, c'est-à-dire les restes des surfaces des compartiments effondrés, sont d'autant plus nombreux et «récents» qu'ils sont situés plus près des remparts périphériques ou des rides structurales résiduelles des cirques. Les blocs tassés et effondrés (Fig. 8.2), conséquences de l'excavation irrégulière des formations tendres profondes, puis du recul des remparts sont, par la suite, repris par une érosion régressive ravinante très active qui les grignote de tous les côtés, les fragmentant en unités isolées de plus en plus petites. Déséquilibrés, ils subissent alors de nouveaux glissements et affaissements qui les remanient et les fragilisent encore davantage (rétroaction positive). Les coeurs des cirques en sont leurs parties les plus «anciennes» où l'érosion a oeuvré depuis le plus longtemps jusqu'à éliminer totalement les îlets.

   Les piémonts des remparts, sites les plus récemment effondrés, sont aussi les zones où les îlets, qui y sont encore «accrochés» (photo A.15), ont souvent les pentes les plus fortes. Ayant subi une seule «génération» de tassements, les matériaux de ces blocs de piémont sont les moins finement remaniés. En surface, on y trouve les héritages les mieux conservés des roches effondrées sous la forme de grands panneaux disloqués de la couverture de laves différenciées (hawaïtes, mugéarites, benmoréites).
8. En plus de ces trois grands cirques, il faut mentionner d'autres structures, plus petites, ayant la même genèse : pour le Piton des Neiges, il s'agit de la Rivière des Pluies, des Bras de Roche Noire et de Sainte Suzanne ; pour la Fournaise, ce sont les Bras de La Rivière des Remparts, la Rivière de l'Est et surtout le Grand Pays à l'amont de la Rivière Langevin. Ces profondes gouttières s'élargissent progressivement en amont, à l'approche de la convexité sommitale : ce sont donc des «cirques embryonnaires», qui sans doute s'élargiront de plus en plus. Le cas de Grand Pays, qui grignote activement la deuxième caldera de la Fournaise (caldera des sables) est typique à cet égard. Signalons que le substratum de Grand Pays constitue la seule zone zéolitisée («dome de chaleur») connue à la Fournaise. Cela a accéléré son excavation en amphithéâtre. Il donne une idée du stade primitif des cirques du Piton des Neiges. Il est probable que la Plaine des Palmistes (scellée actuellement par des laves de la Fournaise) relève antérieurement des mêmes processus morpho-tectoniques et érosifs.

8.2 Nature des matériaux des cirques

Au-dessus de «coulées de base» de type pahoehoe ou autobréchifié, fortement zéolitisées, très rarement visibles (à l'aval des cirques), le soubassement des cirques est constitué de matériaux pyroclastiques bréchiques, cohérents, hétérogènes, non lités («brèches primitives» de L.CHEVALLIER, 1979 ou «océanites anciennes» de

G. BILLARD, 1975) de la phase I du Piton des Neiges et de leurs produits de remaniements meubles interstratifiés ou superposés. Leur âge est supérieur à 2,1 millions d'années. Le «toit» de ces formations bréchiques est situé entre 1 300 et 1 500 mètres d'altitude dans les parties amont des cirques et vers 500 mètres à l'aval. Leur épaisseur totale serait d'environ 700 mètres.

En dessous de ces altitudes, les brèches sont donc recoupées d'aval en amont des cirques par les branches principales du réseau hydrographique extrêmement dense et ravinant. Leurs conditions d'observation sont donc très difficiles du fait, la plupart du temps, de leur situation peu accessible.

Les brèches primitives présentent deux ensembles de faciès :

- des brèches pyroclastiques cohérentes, d'origine phréato-magmatique, constituées d'un assemblage de blocs anguleux souvent scoriacés, de basalte aphyrique ou cristallisé (à olivine, pyroxène, feldspath) à bulles remplies de zéolites blancs. Ces éléments ont le plus couramment entre 1 et 10 cm de large (s'étalant entre 0,5 et 50 cm). Ils sont emballés dans une matrice «indurée» (non terreuse) très riche en éléments vitreux (hyaloclastiques ?) ou faiblement cristallisée. Des passées de tufs scoriacés (quelques mètres d'épaisseur) rougëatre sont fréquents, ainsi que des coulées pahoehoe démantelées.
  Toutes ces brèches ont subi une altération hydrothermale. Elles sont riches en palagonite, calcite, goethite, chlorite, smectites et zéolites. Leur couleur d'ensemble est assez sombre, bleu verdâtre (chlorite) ou brun rougeâtre.
- des brèches détritiques de remaniement
  Ces matériaux, intercalés dans les précédents en proportions très variables résultent du démantèlement par l'érosion pendant la phase I des édifices volcaniques ayant donné naissance aux brèches purement pyroclastiques. Elles sont extrêmement hétérogènes. Les éléments grossiers non triés peuvent atteindre le mètre cube. Ils sont composés de blocs très divers basalte plus ou moins zéolitisé, brèches pyroclastiques, scories, morceaux de dykes.

La matrice, plus ou moins abondante, est d'aspect «cendro-terreux», (à constituants essentiellement vitreux) et friable (les blocs s'en détachent aisément). Elle est souvent elle-même fortement zéolitisée, au même titre que les brèches volcaniques. Parfois, un pseudo-litage se dessine, marquant le sens d'écoulement des coulées boueuses.

L'érosion déblaie très facilement ces matériaux. Au sein de brèches volcaniques plus cohérentes, ils contribuent à fragiliser encore plus fortement l'ensemble.

Les brèches primitives sont traversées de nombreuses intrusions (filons) s'étant injectées dans les réseaux de fractures. Ce sont les dykes (positions redressées) et les sills (sub-horizontaux) ; épais de 30 cm à 10 mètres, parfois regroupés en faisceaux, ils sont composés de basaltes, gabbros ou dolérites. L. CHEVALLIER (1979) a repéré 3 familles principales d'orientations des plans des intrusions :

- direction N 120 : direction majeure du Rift, ayant émis les brèches primitives,
- direction N 30 : failles décrochantes (ou «transformantes») par rapport à la direction précédente (perpendiculaire),
- direction N 70 : fissures d'extension «en relais», accompagnant le mouvement décrochant N 30.

Ces fractures, armées par des intrusions, jouent un rôle important dans la progression de la dissection dans les cirques. Elles guident le tracé de certains axes hydrographiques et, quand les dykes sont épais et peu démantelés, retardent localement l'érosion de rides résiduelles. Parfois, elles forment des plans de glissement des brèches, favorisant les coulées boueuses (Grand Ilet, cyclone Hyacinthe, 1980).

Au-dessus des brèches primitives injectées d'intrusions, se trouve, lorsqu'elle n'a pas été éliminée par l'érosion, la série stratoïdes d'océanites de 500 à 800 mètres d'épaisseur. Ce sont les «océanites récentes» (phases II) de G. BILLARD (1975), qui constituent l'ossature du bouclier du Piton des Neiges. Elle reposent en discordance sur les brèches primitives («océanites anciennes»). La limite est nette sur les remparts périphériques.

La partie inférieure de ces océanites stratoïdes a été zéolitisée et hydrothermalisée. L'ensemble, au moins la partie centrale du bouclier, a été injectéde dykes dans les fractures d'extension selon 4 directions radiales : N 120, N 45, N 160, N 10 (L. CHEVALLIER, 1979), convergeant vers un édifice central. Le tout a été couronné par une vaste caldera (première caldera), accompagnée d'un faisceau dense de fractures concentriques. Tous ces accidents dans la partie supérieure et centrale du dôme-bouclier ont facilité le déblaiement des cirques.

Dans les cirques, les océanites de la phase II en place subsistent au niveau des crêtes résiduelles (crêtes de La Marianne, d'Aurère, du Gueulé Rouge...), non affectées par la morphotectonique récente. Les océanites récentes, affaissées cette fois, forment également le substrat des îlets, particulièrement ceux qui sont encore rattachés aux remparts et qui n'ont encore subi qu'une génération d'effondrements. Sous les petits îlets centraux, cette couverture a été disloquée, en grande partie éliminée ou redistribuée par la morpho-tectonique et l'érosion. Sur la plupart des îlets, on en retrouve des témoins sous la forme de blocs de toutes tailles, dans la couverture détritique, mélangés à des éléments d'âges et compositions différents.

Les laves différenciées des phases III, IV et V (hawaïtes, mugéarites et benmoréites) présentent la même répartition que les océanites récentes qu'elles recouvrent, donc soit en chapeau de certaines crêtes résiduelles, soit sur les compartiments affaissés peu disloqués et nappés alors d'une couverture détritique peu épaisse (surtout à Mafate : Kelval, Plaine des Tamarins). A Bras Sec (Cilaos), on reconnaît en photo aérienne des bourrelets de lave à peine disloqués par l'effondrement. Mais la plupart du temps ces laves, comme les océanites, sont actuellement remaniées en blocs chaotiques dans la couverture détritique épaisse des îlets.

Les pyroclastites terminales (cendres et tufs) de la phase V ont presque partout été décapées ou fortement remaniées. C'est sur les ïlets de Kelval et de la Plaine des Tamarins à Mafate et sur le Grand Matarum à Cilaos qu'on les retrouve le mieux en surface, du fait de la quasi-absence de couverture détritique. Il en est de même à la Mare à Joseph (Cilaos) et à la Plaine des Merles (Salazie). Les cendres y sont «descendues» par affaissement d'ensemble du substrat, sans déformation majeure susceptible. de provoquer un décapage généralisé. Les pyroclastites remaniées constituent une part variable, mais souvent importante, de la matrice de la couverture détritique.

Une couverture détritique superficielle coiffe la topographie bosselée ou chaotique d'à peu près tous les ilets (sauf exceptions mentionnées ci-dessus) sur une épaisseur extrêmement variable comprise entre 1 mètre et plusieurs dizaines de mètres. Cette couverture détritique est éminemment hétérogène des points de vue taille, proportion, triage et nature lithologique des blocs emballés dans la matrice terreuse. Celle-ci est meuble et ne joue pas le rôle de ciment, ce qui en fait un matériau très érodible.

La mise en place de ces matériaux est en interaction étroite avec la morphotectonique récente (et actuelle) à l'intérieur des cirques et le déséquilibre quasi-permanent qui en résulte, interrompu localement avec stabilisation temporaire (ïlets). Les processus d'érosion (arrachements/transits/accumulation), d'effondrements (composante verticale) et de glissements (composante latérale) s'entretiennent mutuellement. Ce déséquilibre fondamental des matériaux et leur redistribution sont accélérés lors des périodes cycloniques qui initient des phénomènes discontinus et catastrophiques : coulées boueuses, glissements d'ensemble (latéraux et rotatifs), éboulements, déjections torrentielles... Les matériaux sont repris continuellement par cette morphodynamique hydro-gravitaire. Les îlets ne sont que des paliers de réajustement morphotectonique, stabilisés provisoirement. Ainsi leurs matériaux sont d'autant plus remaniés et fragmentés qu'ils ont subi de nombreuses générations de glissement/affaissement/tassement, donc qu'ils sont en position plus centrale dans les cirques.

La couverture détritique est composée de gravats, blocailles et matrice «cendro-terreuse» gris-brunâtre, issus du remaniement et du mélange des matériaux effondrés et disloqués d'âges et de lithologie différents, décrits précédemment : «brèches primitives», océanites plus ou moins zéolitisées, hâwaites, mugéarites, benmoréites, pyroclastites, débris de dykes. Les éléments grossiers sont d'autant plus émoussés qu'ils ont subi des transports par les eaux. En fonction de la nature de la morphodynamique, des ébauches de litage et de tris peuvent s'observer. Ceux-ci, basculés ensuite par la morphotectonique, ont des pendages variables. Certains îlets peuvent être constitués par de véritables alluvions à galets et correspondent à des terrasses perchées (aval de Mafate et de Salazie) où à d'anciens couloirs torrentiels autrefois rattachés aux remparts.

8.3 Le modelé dans les cirques

Les remparts d'effondrement périphériques très abrupts, souvent subverticaux, dominent les cirques, exception faite des crêtes étroites et des massifs disséqués (Gros Morne, Piton des Neiges) qui les séparent. Ces escarpements, de 500 à 1 000 mètres de dénivellation, coupent brutalement les planèzes externes en plans faiblement inclinés, dont le modelé d'origine est quasiment intact (photo A.58). Ils recoupent toute la série stratoïde du volcan bouclier, depuis les laves différenciées au sommet jusqu'à la base des océanites récentes de la phase II. Ces océanites, de 400 à 700 mètres d'épaisseur, forment le plus gros de la tranche. A sa base, le mur tranche souvent dans les brèches primitives du substratum. L'escarpement, en larges arcs de cercle à rayons de courbures très variables, est segmenté par de nombreuses arêtes, correspondant aux différents plans de recoupements des effondrements successifs. Ces arêtes sont dominées au niveau des planèzes recoupées par des avancées en pointes qui, lorsqu'elles sont très prononcées, sont appelées des «nez coupés» (Grand Bénard, Piton des Epinards, Roche Ecrite, Piton Plaine des Fougères, Piton Be Massoune...). La base des remparts peut être encombrée de masses effondrées et écailles non descendues totalement. Sur les photographies aériennes, ces paquets sont repérables par leur aspect triangulaire à pointe sommitale.

Les crêtes séparatrices inter-cirques, non affectées par la morphotectonique récente, cloisonnent les cirques entre eux : crêtes du Taïbit et des Trois Salazes, crêtes des Salazes, du col de Fourche, du Piton Marmite et de la Fenêtre pour Mafate/Salazie, crêtes du Piton Bemoune pour Salazie/Rivière des Pluies. Elles correspondent au recoupement des érosions régressives de directions différentes, activées par les 4 niveaux de base, exutoires des cirques. Ces crêtes, très découpées, sont surbaissées par rapport aux sommets des remparts, formant des «cols» entre les cirques. Elles sont constituées, sur leurs versants, de matériaux friables très instables à base d'océanites zéolitisées broyées et «pourries» par l'altération hydrothermale, parcourues de très nombreux dykes étroits qui les découpent et les fragilisent encore davantage.

Les crêtes résiduelles intra-cirques ayant également résisté à la tectonique récente forment de longues rides, renforcées souvent par de grosses intrusions (dykes) ou bien par une consolidation supérieure à la moyenne des matériaux bréchiques inférieurs. La plupart de ces rides sont donc des «fractures armées» selon les directions fondamentales (N 120, N 30 et N 70) et bordées de chaque côté de compartiments affaissés (L. CHEVALLIER, 1979).

Les restes de gros édifices volcaniques : ce sont les gros massifs centraux du Piton des Neiges et du Gros Morne reliés par la crête des Salazes qui dominent les fonds des Trois Cirques, à leur jonction. Les restes de ce stratovolcan, riche au sommet (phases IV, V et VI) en pyroclastites scoriacées et traversé de nombreux dykes, sont attaqués et démantelés de tous les côtés par l'érosion régressive dont les avancées dessinent de larges «ronds» (Ronds du Bras Rouge, Ronds du fond de la Rivière du Mât), entourés d'escarpements rocheux étagés creusés dans les épaisses coulées rigides de mugéarites (phase III) formant le substratum du massif (G. BILLARD, 1975).

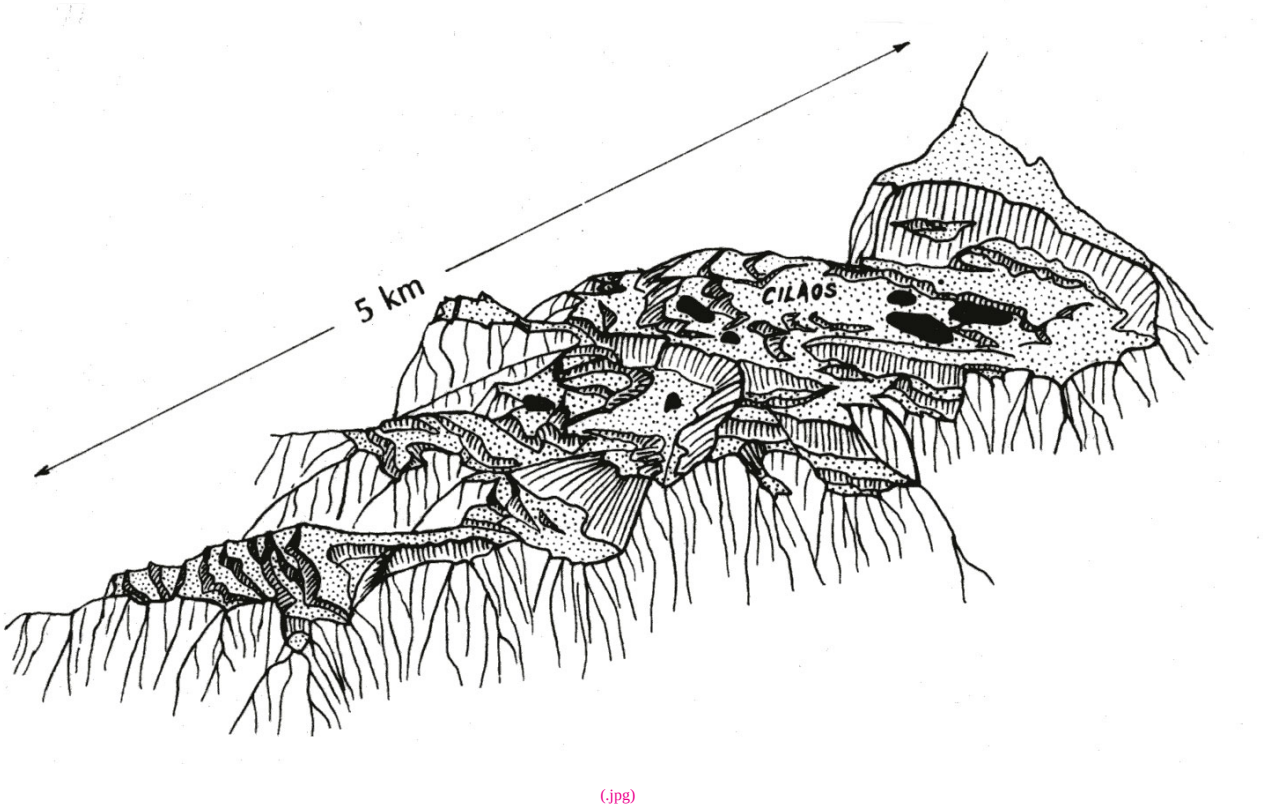
Une autre relique d'édifice explosif (moins important) est constituée par les brèches pyroclastiques rougeâtres et coulées de mugéarites du Piton d'Enchain au centre du Cirque de Salazie. Il s'agit d'un appareil complexe de la phase III, basculé par la tectonique et profondément entaillé par l'érosion.

8.3.1 Les «îlets» (unités 68 à 77)

Les îlets sont les «surfaces-reliques» des compartiments affaissés, glissés ou basculés (photos A.62 et A.63). Les plus grands sont encore rattachés aux remparts. Les plus fragmentés sont coupés de leurs «racines» et isolés dans les «bad-lands». Ils ne reçoivent alors plus de matériaux de l'amont.

Les îlets sont attaqués de toutes parts par un ravinement généralisé de grande ampleur, particulièrement intense en périodes cycloniques, avec, en plus, glissements, éboulements et coulées boueuses. Leurs bordures sont donc extrêmement irrégulières, avec de nombreux promontoires et «rentrants», découpés par les branches amont du réseau hydrographique et le recul de l'érosion régressive. Ces rebords, menacés d'effondrement tous les ans en

FIG. 8.2 – *Morphologie de l'îlet de cilaos. Série de compartiments étagés par affaissements multiples. Marches gauches, contremarches, cuvettes, «bad-lands» escarpées périphériques*



(.jpg)

saison des pluies, surplombent directement, sans transition, les versants ravinés très pentus.

La topographie des îlets présente aussi une grande hétérogénéité qui reflète leur mode de mise en place.

Les racines amont, accrochées à la base des remparts, donc effondrées le plus récemment et pas encore ravinées, sont généralement en pentes très fortes (40 à 70 %), sans replats, boisées. Ces grands versants sont encombrés de chaos de blocs de plusieurs mètres cubes. Ils ont une faible valeur agricole.

Les îlets proprement dits, dont les pentes générales sont inférieures à 40 %, présentent une morphologie de détail très variée, associant replats étagés, versants, bossellements, rides, cuvettes, gouttières, petits escarpements. Un tel modelé résulte de phénomènes de gauchissement et de dislocation des compartiments pendant leurs phases successives d'effondrements, glissements.

La plupart des îlets montrent une succession de gradins et d'escarpements ou petits versants décalés en «touches de piano», correspondant à des compartiments différemment effondrés. Il y a souvent une composante latérale et rotationnelle au glissement, qui provoque un basculement et une remontée de la lèvre aval de chaque bloc. Il se forme ainsi une gouttière et des cuvettes sur le revers déprimé de chaque palier basculé où le drainage s'inverse. De ce fait, certains îlets ont une morphologie montrant une succession de petits «horsts» et «grabens» inclinés transversalement (Fig. 8.2).

Les îlets qui présentent cette morphologie typique en gouttières plus ou moins marquées, cuvettes arrondies, escarpements sont :

- à Salazie : Mare à Vieille Place, Mare à Citron, Mare à Poule d'Eau, Grand Itet, Ilet Vidot,
- à Cilaos : Ilet à Cordes, Cilaos/Mare Sèche,
- à Mafate : La Nouvelle, Plaine des Tamarins, Kelval, Marla.

C'est dans les gouttières que les sols sont généralement les plus intéressants car s'y concentrent des colluvions terro-caillouteuses. Certaines zones peuvent être hydromorphes lorsque l'exutoire est insuffisant. Les cuvettes, qui peuvent avoir entre 30 et 300 mètres de diamètre (unité 76), sont remplies de matériaux fins de décantation et sont souvent inondables, marécageuses ou lacustres. Un certain nombre, «capturées» ou tronquées par le recul de l'érosion, sont actuellement parfaitement drainées (Mare Sèche, Mare à Poule d'Eau, Mare à Martin...).

On comprend donc que chaque îlet est un cas particulier et que chacun est constitué de milieux différents tant du point de vue des matériaux (donc des sols) que du modelé. A cette hétérogénéité qui résulte de la complexité de mise en place s'ajoutent des composantes climatiques et altitudinales (répartition des pluies et températures) qui varient d'un endroit à un autre des cirques.

Seule une étude fine à l'échelle au 1/5 000 pourrait tenir compte dans le détail des lois de répartition purement locales spécifiques à chaque îlet ; le 1/50 000 ne peut représenter qu'un premier zonage morpho-pédoclimatique.

Enfin, la «valeur agricole» d'un îlet en particulier dépend aussi de facteurs «topologiques» purement spatiaux prenant en compte la configuration (taille, formes des limites extérieures), la position et la proximité (accessibilité, éloignement, relations avec les îlets voisins...). Ces critères sont importants pour une évaluation économique, autant que les facteurs purement «physiques». L'examen de la carte peut permettre aux instances décisionnelles d'en tenir compte.

Les versants escarpés à érosion généralisée (unité 78)

Ces secteurs fortement instables en pentes très fortes (40 à 80 %) non protégés par la végétation constituent une grande partie de la superficie des cirques : 75 % à Mafate, 70 % à Cilaos, 50 % à Salazie (compte non tenu des rides résiduelles et des remparts, elles-même très érodées).

Les axes de drainage principaux des cirques ont atteint et entamé largement les «brèches primitives» (océanites anciennes, phase I), matériaux généralement tendres et lardés d'intrusions qui le cloisonnent, facilitant encore davantage son évacuation. Le sapement à la base déstabilise à leur tour les coulées stratoïdes disloquées supérieures puis la couverture détritique.

Le réseau hydrographique à chevelu très ramifié a un potentiel érosif énorme. Sa pente longitudinale en amont des cirques est de l'ordre de 2530 % et encore de 3 % dans les goulots - exutoires. Ce réseau est alimenté et devient actif en saison des pluies, de décembre à avril, particulièrement pendant les périodes cycloniques où il fonctionne en «chasse d'eau», provoquant des phénomènes catastrophiques sur les versants instables gorgés d'eau (coulées boueuses, vastes glissements, effondrements). Les matériaux arrachés transitent en nappes de galets par «à-coups» vers les cônes de déjection extérieurs aux cirques et vers la mer.

Dans le détail, le profil et l'encaissement en long des vallées, les pentes et formes d'érosion des versants qui les dominent sont très divers. Tout cela dépend de la dureté et du pendage des formations recoupées ainsi que de la densité, de l'épaisseur et de la direction des intrusions. Les versants armés de roches dures (sills ou gros bancs de basaltes de la phase II) sont encaissés et cisaillés en gorges étroites avec de multiples seuils au niveau du lit. Les formations tendres (brèches et coulées zéolitisées, matériaux détritiques...) sont tronquées en versants instables dont les profils d'équilibre ne sont jamais atteints. S'y développe alors un ravinement généralisé et profond du type «bad-lands» où s'accroche provisoirement une végétation peu couvrante. Lorsque les versants sont conformes au pendage des matériaux des blocs basculés ou des intrusions qui les traversent, les glissements sont fréquents.

Les versants, érodés dans plusieurs directions, se recoupent en crêtes étroites : une crête principale, parfois armée d'un dyke, et de multiples crêtes secondaires transverses délimitant autant de petits bassins versants.

Les îlets eux-mêmes sont attaqués par le recul de l'érosion qui les effiloche en lanières à contours sinueux.

8.4 La zonation climatique

Globalement le cirque de Mafate est le plus sec, celui de Salazie est le plus arrosé et Cilaos est en position intermédiaire. Ceci est en relation avec l'exposition aux alizés.

Cependant à l'intérieur de chaque cirque, particulièrement à Cilaos et à Mafate, des différences importantes existent pour les îlets, avec des effets orographiques : encaissement, exposition par rapport aux remparts périphériques (effet d'ombre). Ces paramètres s'ajoutent à celui de l'altitude pour caractériser l'ambiance climatique de chaque îlet (total pluviométrique, longueur de la saison sèche, hygrométrie, ensoleillement, températures). Le cirque de Mafate (tab. 8.1) Etant le plus «sous le vent», sa pluviométrie annuelle y est comprise entre 1 600 mm, à la base du rempart occidental, et 2 500 mm, en contrebas des crêtes orientales (Bord de Martin et Col de Fourche) arrêtant mal les alizés en provenance de Salazie. La saison sèche est longue. Sa durée suit le même gradient d'ouest en est : 5 mois à moins de 50 mm et 6/7 mois à moins de 100 mm dans l'ouest ; respectivement, 3 mois et 5/6 mois dans l'est. L'ensoleillement et l'ambiance hygrométrique obéissent à des lois identiques. Les îlets de Mafate peuvent ainsi se regrouper dans un ordre d'humidité croissante.

TAB. 8.1 – *Estimations de quelques paramètres climatiques des Ilets du cirque de Mafate*

	Alt. moy. (m)	Pluies estimées (mm)	nombre de mois secs (< 50 mm)	nombre de mois peu pluvieux (< I OOmm)	Insolation estimée (h)	Hygro. Précip occultes
Ilet des Orangers Grand Place Roche Plate	975 850 1100	1600 à 1800	5	7	250(1	+
Aurère Ilet à Malheur Ilet à Bourse	930 830 (X)0	2000 à 2100	4	6 à 7	2300	+
La Nouvelle	1450			6	2000	+ +
Plaine aux Sables Marla	1450 1620				1700	
Kelval Plaine des Tamarins	1750 1775	2300 a 2500	3	5	1500	+ + +

La végétation naturelle reflète bien ces différences climatiques : sur les remparts occidentaux s'accroche, en dessous de 1 300 mètres d'altitude, une maigre végétation semi-xérophile, alors que les crêtes orientales, les plaines de Kelval et des Tamarins sont occupées par des forêts hygrophiles. Il en est de même pour la répartition des sols des îlets : dans la moitié ouest la pédogenèse est à tendance «brunifiante», alors qu'elle est plutôt andique dans la moitié est.

8.4.1 Le Cirque de Cilaos (tab. 8.2)

Comme à Mafate, les îlets n'y sont pas tous exposés au même climat. Le gradient, du pôle le plus «sec» au pôle le plus «humide», est orienté SW-NE. Ce gradient devient très serré entre la Mare Sèche et la Mare à Joseph, où

la pluviométrie augmente très rapidement alors que l'ensoleillement diminue. En effet, ce coin NE est «inondé» à partir du Coteau Kerveguen par les alizés humides venant de la côte est, canalisés dans les plaines de Bébour-Bélouve. En plus, le haut rempart et le Piton des Neiges laissent cette zone dans l'ombre jusque tard dans la matinée. Lorsque l'effet d'ombre disparaît, les nuages et le brouillard ne tardent pas à arriver.

Comme à Mafate, le Rempart occidental est peu garni de végétation (xérophile) alors qu'au nord-est, entre le Cap Bouteille et le Bonnet de Prêtre, s'accroche une forêt hygrophile de bois de couleur.

TAB. 8.2 – *Estimations de quelques paramètres climatiques des îlets du cirque de Cilaos*

	Alt. moy. (m)	Pluies estimées (mm)	nombre de mois secs (< 50 mm)	nombre de mois peu pluvieux (< 100 mm)	Insolation estimée (h)	Hygro. Précip occultes
Ilet Dennemont	550	1700	4 à 5	6 à 7	2500	+
Ilets Sources	1000					
Coteau des Orangers	1170	1700			2200	
Ilet à Cordes	1100	à	4	6	à	+ +
Mare Sèche	1050	1900			2400	
Peter Both	900	2000			2000	
Palmiste Rouge	880	à	2	5	à	+ + +
Cilaos	1200	2200			2200	
Bras Sec	1275	2600			1500	
Mare à Joseph	1380	à	1	3 à 4	à	+ + + +
Grand Matarum	1500	21X10			1700	

8.4.2 Le cirque de Salazie

Les différences sont ici moins marquées, l'ensemble du cirque étant nettement «au vent», avec des pluviométries moyennes annuelles comprises entre 3 000 (à l'ouest) et 3 800 mm (à l'est) et moins de 4 semaines «sèches».

La partie occidentale (Grand îlet, Camp de Pierrot, Casabois, Le Grand Sable) subit une période peu pluvieuse de 4 à 5 mois, alors que celle-ci ne dure que 2 ou 3 mois dans la moitié est et au sud (Mare à Citron, Mare à Vieille Place, Mare à Poule d'Eau, Hellbourg, Terre Plate). L'insolation annuelle est faible, avec 1 600 à 1 800 heures.

8.5 Les sols des îlets

Les caractères généraux communs à tous les sols des sont leur extrême charge caillouteuse et blocailleuse, ainsi que leur hétérogénéité des îlets spatiale à courte distance.

Dans le détail, la qualité et la répartition des sols se raisonnent par rapport à la logique de mise en place des matériaux et des modelés, croisée avec les caractéristiques climatiques. Du fait de leur jeunesse et de leurs remaniements fréquents, les matériaux ne présentent pas des pédogenèses aussi bien caractérisées que sur les pentes externes du bouclier. Ce sont des sols à tendance brunifiante ou andique dans la matrice «cendro-sablogravillonnaire» emballant les éléments grossiers non altérés, ceux-ci étant généralement dominant en volume (30 à 80 %).

Cette matrice «fine» est toujours à l'origine riche en éléments «vitreux» (verre volcanique), à base d'un mélange de cendres, de tufs, de matériel scoriacé, de sables et de débris basaltiques en partie aphyrique.

En condition de pédo-climat favorable, ce matériel vitreux finement divisé est apte à la pédogenèse andique avec néoformation de minéraux secondaires paracristallins allophaniques. En gros, on a la tendance suivante :

- sols bruns (unités 68 et 69) : altitude 900 à 1 300 mètres, pluviométrie 1 700-2 000 mm, 2 à 4 mois «secs». Sont concernés à Cilaos : les îlets de Peter Both, Palmiste Rouge, Calebasse, l'îlet à Cordes, Cilaos, Mare Sèche. A Mafate : Aurère, l'îlet à Malheur, l'îlet des Calumets, l'îlet à Bourse, Roche Plate, une partie de La Nouvelle.
- andosols désaturés non perhydratés (unités 72 et 73) : altitude 1 300 à 1600 mètres, pluviométrie 2 000 à 2 500 mm, 1 ou 2 mois «secs». Ces situations sont satisfaites en amont du Cirque de Cilaos (Tapcal, Bras Rouge, Bras Sec, Grand Matarum) et du Cirque de Mafate (Ilets du Bord de Martin, Plaine aux Sables, Marla, La Nouvelle). A Salazie, les îlets situés en dessous de 700 mètres d'altitude (Mare à Citrons, Mare à Poule d'Eau) peuvent se rattacher à cet ensemble.
- les andosols désaturés perhydratés (unités 74 et 75) : pluviométrie supérieure à 2500 mm et 0 ou 1 mois «sec». Cela concerne la presque totalité du cirque de Salazie ainsi que l'extrême amont de Cilaos (Cap Bouteille, Petit Matarum, Mare à Joseph) et de Mafate (Kelval, Plaine des Tamarins).

Rappelons que les 2 pôles extrêmes de cette climato-séquence, sols bruns d'un côté, andosols perhydratés de l'autre sont caractérisés, du moins leur matrice fine, par certaines propriétés que l'on peut opposer (tab. 8.3). Les bruns andiques et les andosols non perhydratés se situant sur le gradient intermédiaire

TAB. 8.3 – *Caractéristiques moyennes des sols bruns et andosols perhydratés des cirques*

	Sols bruns	Andosols perhydratés
pH	6à7	5
Matière organique (%)	3 à 5	8 à 15
Capacité d'échange		
cationique (mé/100 g)	10 à 20	5 à 8
Saturation du complexe (%)	70 à 100	20 à 50
Structure	affirmée	continue
Toucher	argileux	limono-sableux
Densité apparente	1 à 1,2	0,4 à 0,5
Consistance	compacte en profondeur	friable thixotropie
Régime hydrique	contrasté	humidité forte permanente

La matrice des sols bruns et bruns andiques possède des propriétés physico-chimiques intéressantes. Leurs contraintes majeures, qui déprécient fortement ces qualités, sont, d'une part leur extrême charge caillouteuse, d'autre part l'irrégularité de la topographie, qui est jonchée de rochers et gros blocs chaotiques indéplaçables, rendant très difficile toute mécanisation.

Les sols sont en général peu épais. La partie supérieure (50 cm) est, la plupart du temps moins caillouteuse que la partie profonde, par ailleurs compacte et peu pénétrable à l'eau et aux racines.

Cette partie supérieure est facilement érodible sur pentes supérieures à 10% (cas le plus courant) surtout si on y pratique un épierrage total.

A Cilaos, malgré la pluviométrie relativement élevée (1 700 à 2 200 mm), la longue saison sèche et la faible épaisseur des sols font que ceux-ci se dessèchent vite. En saison sèche, les zones non cultivées, en jachères anciennes, sont couvertes d'un fourré graminéen à herbes sèches rappelant les bas versants occidentaux de l'île : Rhynchefyfrum repens tapis rosâtre caractéristique), Themeda quadrivalvis, Bothriochloa , Sporobolus , Digitaria , Heteropogon contortus (en dessous de 1 200 mètres d'altitude). Les buissons et fourrés arbustifs

sont riches en Lantana camara (galabert), Schinus terebenthifolius (encens), Litsea glutinosa (avocat marron). Les zones les plus dégradées s'enrichissent en Aristida et en fougères.

A Mafate, les îlets, moins cultivés, sont rapidement envahis par les filaos ou les galaberts.

Plus dans le détail, la qualité des sols est à moduler en fonction du modelé :

- les zones les plus intéressantes sont les gouttières situées sur les revers des compartiments affaissés et dominées par les versants de faille des compartiments (paliers) supérieurs. Ces secteurs légèrement déprimés sont enrichis en matériau fin colluvionné. Les sols y sont plus épais et moins pierreux ; ils présentent un régime hydrique plus favorable et sont moins sensibles à l'érosion.
- les zones les plus rocailleuses et sèches sont les versants à pentes supérieures à 20 % correspondant aux fronts de faille ou de glissement des compartiments étagés. Les sommets des bosses et les rides de ces «marches» basculées sont également «râpées» et difficilement cultivables.
- les versants (10 à 20 % de pentes), intermédiaires entre les bombements et les gouttières, forment l'essentiel des îlets. Les sols y sont toujours très caillouteux, d'une épaisseur comprise entre 20 et 50 cm et très sensibles à l'érosion.

Trois cas particuliers peuvent se présenter :

- les cuvettes endoréiques : isolées dans les gouttières et les parties basses des blocs gauchis, elles sont nombreuses sur certains îlets (Grand Ilet, Mare à Poule d'Eau, Cilaos, Plaine des Tamarins, Kelval...). Elles sont colmatées de matériaux fins de 30 à 60 cm d'épaisseur. Certaines sont occupées par des étangs permanents (Cilaos, Mare des Serrés à Mafate...); la plupart sont temporairement inondables et hydromorphes. Certaines, enfin, ont été capturées par l'érosion régressive et sont utilisables pour l'agriculture (Mare à Martin).
- les épandages torrentiels fonctionnels : ces apports s'étalent sur certains îlets, encore bien rattachés aux escarpements périphériques des cirques. Ils servent encore de «niveaux de base» locaux aux couloirs torrentiels qui en dévalent pendant les épisodes cycloniques. Ces bandes sablo-caillouteuses «fonctionnelles» riches en galets sont inutilisables pour l'agriculture. On les trouve particulièrement sur certains îlets de Salazie : Camp de Pierrot, Casabois, Grand Sable, Plaine des Merles. A Cilaos, on en voit à Bras Sec et à Mafate sur l'îlet de Marla.
- les talus colluviaux de piémont : on les trouve, sur une largeur de 50 à 300 mètres, au raccordement des îlets avec les remparts, les crêtes résiduelles qui les dominent ou bien les gros blocs pentus qui y sont encore accrochés. Ce sont de petits glacis concaves, fortement relevés en amont (jusqu'à 25 de pente). Ces talus sont souvent enrichis en matériaux fins par rapport à la surface des îlets proprements dits. Les éléments grossiers, amenés par les eaux après de faibles transports, y sont moins gros et moins chaotiques. Ces zones à sols épais car moins compactés qu'ailleurs en profondeur, sont toujours intéressants pour l'agriculture, mais très sensibles à l'érosion.

8.6 Le cas des compartiments effondrés/glissés des flancs de bouclier

La genèse de ces «plaines» perchées est un peu différente de celle des îlets des cirques. Il s'agit surtout du Tevelave, de l'Entre-Deux et de la plaine des Grègues (Fig. 1.3). A ces trois ensembles principaux, il faut ajouter la série de petites gouttières triangulaires, situées à l'ouest du Tapage à l'aval de la chaîne du Bois de Nèfles. Il s'agit de glissements latéraux récents de grande ampleur dans le volcanisme ancien (phase II du Piton des Neiges ou phase I de la Fournaise) fragilisé à sa base par l'altération hydrothermale ou le réseau de fractures et d'intrusions. Un aquifère profond a probablement favorisé la dynamique. Ces glissements ont entraîné les laves (cendres et coulées) plus récentes. Tous les matériaux affectés ont ainsi été mélangés en une épaisse formation détritique, très hétérogène, formant actuellement le substrat de ces plaines qui rappelle celui

des îlets des cirques. On y retrouve aussi, bien que moins accentué, le modelé bosselé, gauchi et chaotique, dû à la descente latérale, sur plusieurs centaines de mètres de dénivellation, de ces vastes compartiments.

- La plaine de Dos d'Ane et la plaine des Makes ont des origines semblables. Elles sont cependant antérieures au recouvrement terminal de cendres et tufs du Piton des Neiges (et même anté phase IV pour la plaine des Makes), de sorte que leur topographie d'effondrement est moulée par ces dépôts postérieurs. Leurs sols, sur pyroclastites en place, y sont plus homogènes. Ces deux plaines ont, pour ces raisons, été intégrées aux unités 32 à 35 précédemment décrites.
- La plaine du Tevelave (175 hectares), à 800 mètres d'altitude, avec une pluviométrie de 1 600-1 800 mm, possède une prédominance d'andosols non perhydratés. La matrice fine est composée d'un mélange de cendres (phase V) et d'altérites ferrallitisées du basaltes de la phase Il. Les éléments grossiers, de toutes tailles, sont un mélange de basalte (phase II), d'hawaïtes (phase III) et de mugéarites (phase IV). C'est à l'aval de la plaine que les blocs sont les plus gros et nombreux. Cette plaine se consacre aux cultures maraîchères et vivrières, ainsi qu'au géranium.
- La plaine de l'Entre-Deux (550 hectares), entre 280 et 475 mètres d'altitude, est arrosée par 1 500 à 1 700 mm de pluie (en position «sous le vent» avec 3 mois «secs»). Elle est cultivée en canne à sucre jusqu'à 400 mètres, puis en cultures maraîchères, vivrières, fruitières et florales au-dessus. Les fleurs sont une spécialité de cette zone (fort ensoleillement). Les sols sont formés sur un matériau détritique à base de basaltes plus ou moins altérés de la phase II en amont et des phases III et IV en aval. Une grande partie des masses glissées et coulées boueuses entre les crêtes rectilignes du massif du Dimitile (photo **??** est constituée de matériau argileux halloysitique de couleur brun rougeâtre. Les éléments grossiers (basalte ancien) y sont, en règle générale, moins gros que sur les îlets des cirques. Tout à fait en amont, entre les versants montagneux, la plaine se subdivise en couloirs étroits remplissant les grandes vallées sub-parallèles du massif du Dimitile. S'y appuient des produits torrentiels et des masses glissées sub-actuelles à partir des versants très escarpés et instables sur basalte altéré. Les matériaux superficiels s'enrichissent alors en blocs de grande taille.
  La pédogenèse actuelle sur ces matériaux est à tendance brunifiante (pH 6 à 7) en dessous de 400 mètres et plutôt «brun-andique» au-dessus (pH 5,5 à 6).
- La plaine des Grègues (170 hectares) est située sur le flanc sud de la Fournaise entre 600 et 800 mètres d'altitude et cultivée surtout en canne à sucre (cultures vivrières en amont). Cette fois, c'est dans les vieux basaltes de la Fournaise que se trouve la semelle de glissement. Celui-ci est postérieur aux recouvrements cendreux (à «tuf jaune») issus du Piton des Neiges qui se sont incorporés aux basaltes disloqués formant le substrat de la plaine. La topographie d'ensemble est ici sub-horizontale, malgré la présence de nombreux bossellements. Les blocs et cailloux (coulées disloquées) sont plus nombreux qu'à l'Entre-Deux. Aux pieds des escarpements se sur ajoutent les chaos d'éboulis rocheux. Avec une pluviométrie annuelle de 3 000 mm, la pédogenèse de la matrice (riche en cendres) est nettement andique (non perhydratée).

8.7 L'érosion dite «géologique» dans les cirques

Ce type d'érosion, le plus spectaculaire, se traduit par des phénomènes de grande ampleur, généralement discontinus du point de vue spatio-temporel, souvent catastrophiques pendant les périodes dépressionnaires et cycloniques. Ce sont les ravinements géants (photos A.62 et A.63), profonds, généralisés («bad-lands») et les mouvements de masse (coulées boueuses, glissements, éboulements, etc.) ; les premiers sont dus à l'action mécanique directe des eaux de surface et affectent plutôt les grands versants très pentus à pendages amont (brèches, coulées disloquées, intrusions) ; les seconds sont provoqués par les eaux d'infiltration profonde dans les matériaux bréchiques ou zéolitisés armés d'intrusions à pendages aval. Cette érosion est la conséquence d'un déséquilibre gravitaire fondamental des matériaux détritiques altérés et disloqués, entretenu par la différence de potentiel énergétique des eaux entre le littoral et les cirques. L'érosion régressive arrache et déstabilise ces formations. Les violents régimes torrentiels à fortes pentes longitudinales sapent les bases des îlets soumis à appels au vide, entraînant une décompression - avec dislocation ou déconsolidation - des matériaux, que les pluies abondantes viennent saturer, augmentant leur poids et diminuant leur cohésion. Ainsi de vastes panneaux s'effondrent ou glissent plus ou moins loin. Les intrusions obliques (dykes et sills) servent souvent de

plans de glissements favorisant ou accélérant les décollements. Ils peuvent aussi être à l'origine de la mise en charge de poches d'eau. Cette dynamique peut entraîner un brutal départ en masse fluide (coulées boueuses qui «s'engraissent» progressivement) ou des affaissements/tassements d'ensemble, étagés (photo A.63). A Salazie les deux principales catastrophes, celle de 1875 à Grand-Sable (62 morts) et celle de 1980 à Grand-Ilet (10 morts) ont ainsi été favorisées par la présence de grosses intrusions à pendage aval sur lesquelles les matériaux saturés d'eau ont brutalement flué, entraînant ou recouvrant les habitations (photo A.60).

Outre la nature bréchique très hétérométrique et diversement consolidée des formations, leur saturation différentielle par les eaux d'infiltration, l'appel au vide et l'affouillement dus aux ravines, les autres facteurs qui favorisent ou orientent les départs sont : d'une part, les facteurs litho-structuraux (discontinuités lithologiques, découpage par la fracturation et dispositions des pendages), d'autre part l'altération hydrothermale profonde (zéolites, smectites, chlorites).

Dans le détail cette dynamique est extrêmement diverse et très difficilement prévisible. Il y a trop de facteurs locaux qui peuvent se combiner en synergie et s'autocatalyser. Il faut être à l'affût de certains signes précurseurs, tels l'apparition de fissurations ou de petites niches de décollement, les déformations routières, les chutes anormales de pierres, le tarissement ou l'apparition de sources. Ce sont souvent les agriculteurs qui, par leur bonne connaissance des terrains, sont les mieux à même de percevoir ces signes. On ne peut que délimiter des zones «sensibles» où les départs ou arrivées brutales de matériaux ont le plus de chances de se produire. C'est évidemment lorsque les terrains sont gorgés d'eau que les risques de glissement sont les plus élevés, donc après de longues périodes pluvieuses. C'est au-delà de 5 jours ininterrompus de fortes pluies que l'instabilité des matériaux est maxima (J.L. HAURY, 1987). Cela se produit de janvier à mars.

L'analyse et la cartographie des «zones à risques» ont été entreprises à Cilaos et Salazie par HUMBERT, PASOUET et STIELTJES (1981) et plus récemment à Salazie par HAURIE (1987 et 1990).

La prévention ne consiste pas à vouloir empêcher cette érosion de se produire mais à interdire les habitations sur les zones à risques : bordures de plateaux dominant les versants instables, axes et aval des couloirs de coulées boueuses possibles, pieds de remparts risquant les écroulements etc. Il faut également interdire les infrastructures lourdes sur ces zones instables.

Les risques les plus importants peuvent apparaître après les éboulements et en découler indirectement, lorsque ceux-ci viennent à obstruer sur de grandes épaisseurs des vallées étroites et à fortes pentes longitudinales. L'énorme volume d'eau qui se met en charge à l'amont exerce une pression considérable pouvant aboutir à une rupture brutale du barrage. La masse boueuse dévale alors à grande vitesse en aval, sapant et englobant de nouveaux terrains sur son passage, pour balayer des terrasses et «bas-îlets» habités. De tels barrages qui se forment en périodes cycloniques sont d'autant plus dangereux qu'ils ne sont pas toujours détectables immédiatement, ne permettant pas une évacuation précoce.

Les aménagements que l'homme peut entreprendre paraissent bien dérisoires comparés à l'énergie de ces gigantesques mouvements de terrains. Seuls peuvent être envisagés des travaux ponctuels de protection d'ouvrages. L'ONFA.3. a ainsi mis en place (photo A.61) un réseau de fascines étagées en amont de la cicatrice de la coulée de Grand Ilet (cyclone Hyacinthe, 1980). Cet ouvrage vise, par la végétalisation progressive du versant vif, à ralentir et étaler les écoulements (en faveur de l'infiltration) et donc la descente brutale des matériaux torrentiels. L'aval, en particulier la route, est ainsi protégé de l'effet «boule de neige» et des recouvrements brutaux ; par contre coup, l'amont voit son érosion régressive freinée par arrêt des sapements basaux.

8.8 L'agriculture dans les cirques - contraintes

Autrefois lieu de refuge des esclaves «marrons», la colonisation agricole des cirques n'a débuté qu'au XIXè siècle (à partir de 1930 surtout).

L'agriculture dans les cirques est et restera marginale. Elle ne pourra jamais permettre aux «Petits Blancs» de vivre correctement. Il y a actuellement un fort exode rural avec abandon de surfaces cultivées sur certains îlets.

Les conditions y sont en général très difficiles : sols peu épais et blocailleux (photo A.59), pentes fortes, érosion active, morcellement du micro-parcellaire (exploitation de 1 à 2 hectares), accessibilité difficile, souvent manque d'eau pour irriguer. Il s'agit davantage de jardinage et de cueillette pour l'autosubsistance que d'une véritable agriculture. Les petits élevages «hors-sols» (porcs, volailles) sont nombreux.

La plupart du temps, tous les travaux sont manuels. Les cultures vivrières (maïs, grains...) sont semées «au trou» pratiqué à la pioche ou à la «gratte». Le travail du sol se résume à un travail manuel à la houe, entre les cailloux, tout comme le sarclage.

Les zones les plus intéressantes sont les creux du relief bosselé des îlets, remblayés de matériaux colluviaux relativement meubles. Les cailloux y sont moins gros que sur les versants et les parties hautes sur lesquels le décapage suit rapidement l'épierrage, de sorte que ces cailloux «poussent» sans fin dans les parcelles.

Les sols se résument souvent à un horizon de surface ameubli à la houe, reposant sur un matériau détritique compact, impénétrable aux racines. Ces sols peu épais deviennent donc rapidement «secs» du fait de leur faible réserve hydrique. C'est à Cilaos et à Mafate que la sécheresse est la plus grave. Des captages permettent parfois l'irrigation d'appoint (Mafate, Cilaos) mais les débits sont généralement insuffisants et trop irréguliers.

– A Salazie, l'espace agricole cultivé réellement est de 850 hectares. Jusqu'à 800 mètres d'altitude, on cultive surtout la canne à sucre, associée à des cultures vivrières et maraîchères (maïs, haricot, chouchou...), à du tabac et à des vergers (bananiers, agrumes, litchi). Les îlets de Mare à Vieille Place, Mare à Citron et Mare à Poule d'Eau sont ainsi les plus «riches» des cirques. Au-dessus de 800 mètres et jusqu'à 1 100 mètres, c'est le domaine des cultures vivrières (maïs, haricot, pois, pomme de terre, patate douce, etc...) et maraîchères (chouchou). A Grand-Ilet, un captage (Bras des Merles) permet d'irriguer quelques légumes ; on voit de rares vergers (pêchers, parfois agrumes) et quelques prairies et parcours d'élevage.
– A Cilaos (environ 6 000 habitants), l'espace cultivé est de 340 hectares (dont 135 ha irrigués à l'îlet à Cordes). L'essentiel est cultivé en maïs, lentilles et haricots. Ensuite, viennent les pois, l'arachide, le tabac, la pomme de terre, l'arboriculture (20 hectares) avec la vigne essentiellement. - A Mafate, où vivent environ 120 familles, moins de 75 hectares sont actuellement cultivés - surtout en maïs et lentilles - aidés par des petits captages d'eau (surtout à Aurère). Un peu de géranium est cultivé à la Nouvelle. Les prairies des clairières forestières et sous-bois de Tamarins, des îlets humides de Kelval et de la plaine des tamarins servent de parcours aux troupeaux de bovins en liberté appartenant à des familles de Marla (photo A.63).

8.8.1 L'érosion dite «agricole»

Cette érosion, cette fois anthropique, concerne les sols cultivés sur les «îlets». La pratique de cultures vivrières (grains, maïs...) faiblement couvrantes, les sarclages et les épierrages qu'elles nécessitent sur des sols peu filtrants à pentes souvent fortes, occasionnent des ruissellements et décapages en nappe importants. Ceux-ci se concentrent aisément en rigoles puis en petites ravines remontantes, de plus en plus difficiles à maîtriser. L'agriculteur voit ainsi les cailloux «pousser» dans son champ. L'intensité de ce décapage est variable suivant la pente. Rappelons également que c'est dans les cirques que l'on a enregistré les plus fortes intensités de pluies (records à Cilaos avec 413 mm/h en 30 minutes). L'agressivité des pluies y est donc particulièrement élevée.

Depuis la période 1830/1850, début de la colonisation et du défrichement des cirques, du fait de l'érosion annuelle, les sols, originellement sous couvert forestier, ont été considérablement appauvris en matière organique et réduits en épaisseur. Faible épaisseur et granulométrie sablo-caillouteuse en font des sols à faible réserve hydrique. De ce point de vue, les sols des gouttières et cuvettes, plus épais et moins pierreux sont les meilleurs si toutefois ces zones basses ne sont pas inondables.

La diversité des situations (accessibilité des engins, configuration du parcellaire, topographie, possibilité d'irrigation, charge pierreuse...) est telle qu'il paraît très difficile de formuler des recommandations précises concer-

nant la gestion des sols des îlets. On ne peut énoncer que quelques principes généraux :

- les zones suivantes ne devraient pas être cultivées, mais boisées :
  - les parties des îlets à pentes générales supérieures à 25 % (unités 69, 71, 73 et 75 de la carte),
  - les bordures des îlets dominant les grands escarpements ravinés (unités 78), sur une largeur de 20 à 50 mètres. Il faut en effet stopper totalement le ruissellement sur ces franges de façon à ralentir l'alimentation du ravinement régressif qui grignote rapidement les surfaces cultivables. De telles situations de bordures de plateaux sont par ailleurs des «zones à risques» où l'appel au vide sur un matériau saturé d'eau peut occasionner des effondrements et fluages brutaux (départs de coulées boueuses). Les habitations et infrastructures lourdes devraient donc en être systématiquement exclues.
- l'agriculture des cirques devrait privilégier les cultures pérennes par rapport aux cultures annuelles. La véritable «vocation» des terres (en tout cas sur les pentes supérieures à 20%) nous paraît être l'arboriculture fruitière, non ou faiblement mécanisée. Les fruitiers, plantés au trou, s'accommodent en effet très bien des sols caillouteux. La couverture du sol, contrôlée aux herbicides, peut rester enherbée.
- les cultures vivrières et maraîchères (maïs, haricots, lentilles, chouchou...), ainsi que le tabac (surtout à Cilaos) ne devraient occuper que les pentes inférieures à 10 % et en priorité les zones «basses» (gouttières, cuvettes drainées), où les risques de décapage sont moindres.
- les parcelles consacrées aux plantes annuelles devront être stabilisées, après régénération pour celles qui sont les plus dégradées. Si les engins peuvent accéder, la régénération pourra consister dans un premier temps en un déroctage et un approfondissement au bull (avec ripper et râteau), puis un enfouissement de fumier ou compost à doses élevées. Après affinage et roulage, on implantera rapidement, par bouturage manuel, une prairie à kikuyu qui restera 3 ou 4 ans pour renforcer la structure du sol et créer une activité biologique. Seul l'épierrage grossier (cailloux supérieurs à 20 cm) se justifie, puisque la mécanisation est généralement impossible (géométrie défavorable, absence de SICAA.3...). Les produits d'épierrage devront être alignés en andains suivant les courbes de niveau. Pour éviter le décapage, le sol devra rester couvert et subir un minimum de sarclages. Il faudra s'inspirer des techniques suivantes : semis direct, désherbages chimiques, étalement des résidus de récolte, si possible couverture vivante permanente (kikuyu...), assolements à bandes alternées isohypses...

Chapitre 9

LES UNITES DE MILIEU SUR FORMATIONS SUPERFICIELLES (Unités 80 à 93)

Ce sont les matériaux mis en place par les eaux ou le vent, excluant les retombées volcaniques pyroclastiques (cendres et tufs) et les formations détritiques des cirques (blocs effondrés, éboulis...).

Pour leur très grande majorité (exception faite des sables madréporiques), ce sont des produits d'érosion et de remaniement des formations volcaniques, qui se sont accumulés en périphérie des boucliers, construisant des modelés littoraux.

Les formations superficielles ainsi définies représentent 17 500 hectares et sont réparties de la façon suivante :

- «alluvions à galets» (cônes de déjection) : 12 500 hectares,
- alluvions fines (ennoyages et piégeages) : 3 000 hectares,
- lahars et coulées boueuses : 300 hectares,
- sables littoraux : 1 950 hectares.

9.1 Les «alluvions à galets» des cônes de déjection (unités 80 à 83)

De loin l'ensemble le plus important (1/20 de l'île en superficie), les alluvions à galets constituent les vastes épandages situés aux exutoires des cirques et profondes échancrures qui éventrent les massifs (photos A.13 et A.57) :

- Rivière des Galets (aval du cirque de Mafate),
- Rivière Saint-Etienne (aval du cirque de Cilaos et du Bras de la Plaine),
- Rivière du Mât (aval du cirque de Salazie),
- Rivière Saint-Denis,
- Rivière des Pluies,
- Rivière des Roches,
- Rivière des Marsouins,
- Rivière de l'Est,
- Rivière des Remparts,
- Rivière Langevin.

Trois sous-ensembles inégaux se distinguent : les alluvions «anciennes», les alluvions «récentes» et les épandages actuels.

9.1.1 Les alluvions anciennes unités 80 et 81)

Des terrasses «anciennes», c'est-à-dire à sols déjà bien évolués, s'observent à l'aval de la Rivière des Pluies (Gillot), près de Saint-Benoît (en aval de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins), ainsi qu'à SavannahGrand Pourpier (Rivière des Galets).

Les alluvions anciennes de Gillot et de Saint-Benoît, exposées «au vent», présentent un début d'altération ferrallitique.

Les épandages de Savannah («sous le vent»), montrent une altération montmorillonitique.

Les alluvions anciennes en début de ferrallitisation (unité 80)

La terrasse de Gillot/Rivière des Pluies fait 500 hectares. L'ensemble de Saint-Benoît représente 600 hectares. En dehors de ces deux secteurs principaux, on en observe des lambeaux entre Saint-Denis et la Bretagne ainsi que près de Saint-André. Mis à part les zones urbanisées (à SaintBenoît et Gillot surtout), ces terrasses sont occupées par des cultures de canne.

Les terrasses de Saint-Benoît (Beauvallon, Beaulieu) ont été en partie recouvertes par les dernières coulées (benmoréites de la phase VI) du Piton des Neiges, ayant emprunté les mêmes trajets que les alluvions, à savoir les gouttières de la Rivière des Roches et de la Rivière des Marsouins. Au sud de Saint-Benoît (Beaufond), elles ont également servi de support aux coulées basaltiques de la phase IV du Piton de la Fournaise. Les alluvions anciennes sont donc antérieures à ces épisodes effusifs ; d'autre part, on n'y voit pas de recouvrements cendreux de la phase V du Piton des Neiges. Par conséquent, leur âge est encadré par ces événements, c'est-à-dire qu'il pourrait se situer dans la fourchette 12 000-20 000 ans.

Ces alluvions anciennes ne paraissent pas résulter d'une érosion à l'intérieur des «Cirques» actuels, dont le creusement et le déblaiement sont plus récents encore (moins de 10 000 ans). La nappe ancienne de Saint-Benoît provient de l'éventration et du démantèlement du bouclier entre les massifs résiduels actuels (phase II) d'Eden-Libéria au nord et du cratère au sud. A ces endroits, les flancs du bouclier formaient les «revers» de la première caldera du Piton des Neiges. L'érosion régressive, qui s'est élargie en amont (début de «cirque»), a profondément mordu dans le plancher de cette première caldera dont la Plaine des Lianes, le Plateau Mazerin, le Camp de Marseille et l'îlet Patience constituent des témoins actuels. Les alluvions qui ont construit en aval les terrasses anciennes, ont dévalé par 3 grandes gouttières de creusement (Rivière des Roches, Grand Bras, Rivière des Marsouins) séparées par des rides résiduelles (Grand Rein, Grand Battoir, chaîne du Piton Papangue). Ces trois gouttières ont canalisé ensuite les coulées de la phase VI (fissure émittrice des Deux Mamelles), «fossilisé» en partie les alluvions antérieures, l'ensemble continuant à s'entailler, avec, dans le bassin de la Rivière des Roches, effondrements de grands blocs du type «îlets».

Les petits lambeaux d'alluvions anciennes de Saint-André paraissent avoir eu pour origine une excavation en alvéole du même type, située entre les massifs anciens actuels du Bras Citron (NW) et du Bras des Lianes (SE). L'amont de cet alvéole entrait légèrement dans le cirque de Salazie actuel qui s'est très largement ouvert et surcreusé par la suite.

Enfin le cône ancien de Gillot a eu pour origine la première étape des excavations de la Ravine du Chaudron et de la Rivière des Pluies.

Une grande partie des alluvions anciennes ont été déblayées et emboîtées par les cônes de déjection postérieurs, en particulier celui de la Rivière du Mât consécutif au creusement du cirque de Salazie.

- Les sols

L'altération des «alluvions à galets» a pénétré en profondeur sur plusieurs mètres. La taille des galets est généralement moins importante que celle des alluvions récentes et actuelles (voir plus loin) ; elle ne dépasse pas 50 cm, la moyenne des plus gros étant 10 à 20 cm. La surface du sol n'est jamais encombrée de gros blocs mais plutôt de cailloutis arrondis de 5 à 20 cm. L'altération se traduit par une argilification et une rubéfaction ou jaunissement des sables, graviers et périphéries des galets. Ceux-ci s'effritent et se desquament en écailles concentriques jaunâtres (fer) et noirâtres (manganèse). Seuls les plus gros galets possèdent encore un coeur sain.

En surface (0-30 cm), le sol est brun foncé, sa texture est argilo-limoneuse. Sa structure est polyédrique fine à moyenne à éléments stables. Les racines (canne le plus souvent) y sont très abondantes.

Le taux de matière organique y est de 4 à 6 % (C/N = 10 à 11). Le pH est de 5,5 à 6. Le taux de phosphore échangeable est de 100 à 150 ppm (pour 1500 à 1700 ppm de phosphore total).

En dessous, la couleur de la matrice, argilo-limoneuse, passe au brunrougeâtre. Les éléments grossiers altérés sont jaunâtre ou noirâtre. Ils occupent 20 à 40 % du volume total. La structure est assez massive, mais les racines pénètrent bien. A 50 cm de profondeur, il reste environ 1,5 % de matière organique (C/N = 10). La capacité d'échange cationique est d'environ 8 mé/100 g. Le complexe adsorbant possède 4 à 5 mé de Ca++, 2 à 3 mé de Mg++, 0,3 mé de K+. La saturation est élevée (60 à 80 %).

- Aptitudes

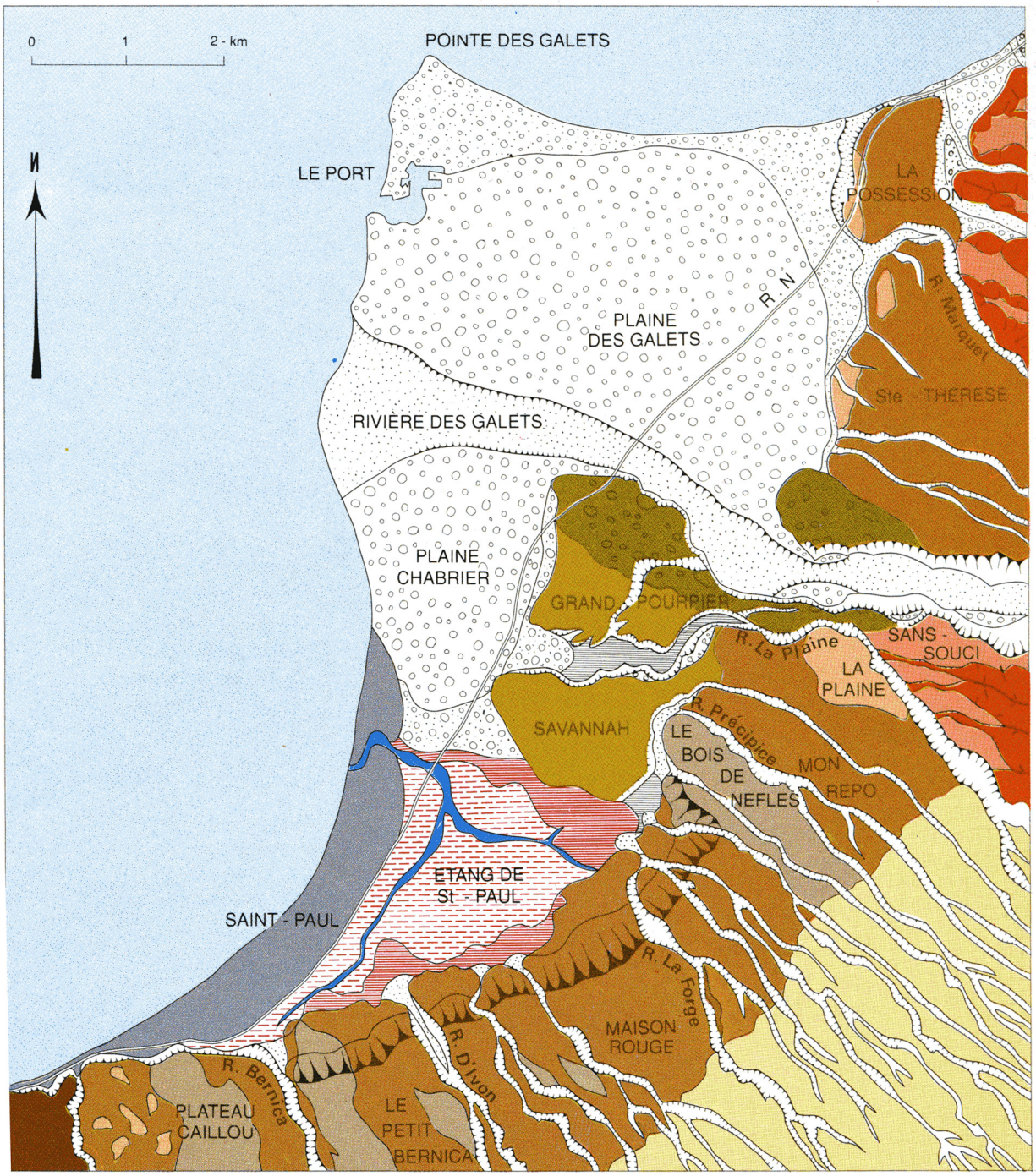
Les zones qui ne sont pas encore urbanisées ou réservées aux équipements (aéroports, usines...) font partie de grandes exploitations sucrières, mécanisées le plus souvent.

La pierrosité est peu contraignante. La fertilité de ces sols est comparable à celle des sols ferrallitiques de l'unité 17 (voir Chap. 6)

Les épandages «anciens» à altération montmorillonitique (unité 81)

Ce type de milieu concerne 250 hectares (Savannah et Grand Pourpier), au nord de l'Etang de Saint-Paul qu'il domine (Fig. 9.1). Il constitue un plan incliné très régulier de 4 à 5 % de pente, situé entre 30 et 90 mètres d'altitude ; il est coupé au centre par une vallée encaissée à large fond plat (400 mètres à l'aval) dite «Ravine La Plaine». Ces «plateaux» (GrandPourpier au nord et Savannah au sud) forment un éventail (cône) faiblement bombé, à génératrices «bien tendues» (photo A.16). Ce cône s'appuie au nord sur une langue de reliefs bosselés qui le domine d'une cinquantaine de mètres et qui représente le modelé figé d'une coulée géante de boue et blocailles (brèches), variété de «lahar» (unité 89).

FIG. 9.1 – *Région de Saint Paul/ La Possession : esquisse geomorphologique*



Massif des "tufs de St-Gilles" phase II

Relief de dissection océanites phase II

Planèzes d'océanites phase II

Planèzes d'hawaïtes phase III

Planèzes de mugèarites phase IV

Manteau pyroclastique Cendres et tufs phase V

Placages de tufs résiduels phase V

Lahar "froid", visqueux brêchique, bosselé.

Lahar"froid" Fluide conglomératique, plan

Alluvions récentes à gros galets dominants

Alluvions récentes à sables et galets

Epandages actuels à galets

Remblaiement limono-argileux non hydromorphe

Remblaiement limono-argileux hydromorphe

Etang de St - PAUL

Cordon littoral (sables basaltiques)

Ancienne falaise littorale (grand escarpement)

(.jpg)

Une partie de ces matériaux provenait probablement d'alluvions à galets accumulés antérieurement au fond du lac de barrage originel et donc déjà saturées d'eau.

Le terme d'«alluvions» que nous avons adopté par commodité (absence de vocabulaire adéquat) pour cet ensemble (non trié et mal lité) n'est donc pas vraiment approprié. La nature du matériau et sa mise en place brutale sont bien spécifiques d'un grand «cône boueux» très liquide (et non pâteux).

- Les sols

La surface, à l'origine encombrée de très nombreux blocs, a été épierrée pour la culture mécanisée de la canne à sucre. Ces blocs sont regroupés en grands andains délimitant les parcelles de culture irriguée. L'épierrage grossier a concerné les 25 premiers centimètres.

Les sols sont des sols bruns vertiques (riches en montmorillonite), très argileux, bien structurés, de couleur brune, de 60 à 100 cm d'épaisseur.

- L'horizon supérieur (0-25 cm) est brun foncé, à structure polyédrique anguleuse moyenne à fine (agrégats très cohérents à l'état sec). Les racines de canne y forment un chevelu dense. Les cailloux, peu nombreux (moins de 10 % en volume), sont inférieurs à 10 cm. L'analyse granulométrique de la matrice donne en moyenne :

- argile (0-2 μ) : 51 %
- limon fin (2-20 μ) : 23 %
- limon grossier (20-50 μ) : 10 %
- sable fin (50-200 μ) : 7 %
- sable grossier (200-2.000 μ) : 9 %.

Le taux de matière organique est de 3 à 3,5 % (C/N = 10 à 11). Le pH est de 6,9 à 7. La capacité d'échange (CEC), élevée, est d'environ 30 mé/100 g. Le complexe adsorbant (saturé à 90 à 100 %) est composé de 18 mé Ca++, 8 mé Mg++, 0,6 mé K+, 0,6 mé Na+.

Il y a 50 à 100 ppm de phosphore assimilable (Olsen) pour 1.000 ppm de phosphore total.

- L'horizon B (entre 25 et 40/80 cm de profondeur) est de couleur brune (état sec) à brun foncé (en humide). Il compte 20 à 60 % d'éléments grossiers peu altérés. Les racines fines (canne) y sont abondantes. La structure de la matrice argileuse est polyédrique grossière à très grossière ; les agrégats sont très anguleux, lourds et compacts (densité apparente de l'ordre de 1,6). Quelques «faces de glissements» peuvent s'observer à la base de l'horizon. La répartition granulométrique moyenne est la suivante :

- argile (0-2 μ) : 57 %
- limon fin (2-20 μ) : 21 %
- limon grossier (20-50 μ) : 10 %
- sable fin (50-200 μ) : 6 %
- sable grossier (200-2.000 μ) : 6 %

Le taux de matière organique est d'environ 2 % au sommet de l'horizon et de 1 % dans la moitié inférieure. Le pH est proche de la neutralité (moyenne: 6,8). Le complexe absorbant à une capacité d'échange toujours élevée (de l'ordre de 25 à 30 mé/100 g), saturé à 80-100 %, par 12 mé de Ca++, 6 mé de Mg++, 0,2 mé de K+ et 1 mé de Na+-.

- En profondeur : on passe au matériau non altéré composé de gros blocs émoussés (50 à 80 % en volume), emballés dans un ciment grisâtre ou jaunâtre clair, lui-même riche en sables et graviers. Ce ciment massif présente une compacité variable. On le brise aisément à la main, mais il est peu favorable au passage des racines et ralentit l'infiltration de l'eau.

- Aptitudes

La majeure partie de ces terres (120 ha) sont en monoculture de canne exploitée par les Sucreries de Bourbon (périmètre irrigué de Savanna). La canne y est irriguée essentiellement au goutte à goutte (réseau enterré, engrais solubles) par une conduite forcée à partir de La Rivière des Galets, par le Canai Lemarchand. La zone du Grand Pourpier/Plaine Defaud (70 ha), domaines privés, est irriguée en aspersion.

Les terres ont été structurées en grandes unités et elles ont bénéficié d'épierrages (andains en limites de parcelles). Mais à chaque dessouchage et replantation, de nouveaux cailloux sont ramenés en surface, de sorte que la mécanisation de la coupe n'a pas encore été possible. Toutes les autres opérations sont mécanisées.

Les sols présentent de bonnes qualités chimiques (pH neutre, forte capacité d'échange). Le chaulage est inutile.

La pente faible (4 à 5 %) et la bonne stabilité structurale rendent cette région peu exposée à l'érosion.

Les contraintes sont plutôt d'ordre physique et concernent le travail du sol et l'irrigation : pierrosité, faible perméabilité (1 à 3 mm/h), faible porosité, forte densité apparente (sols «lourds»).

L'irrigation par aspersion, à débit trop rapide (12 mm/h), s'avère peu adaptée. Le goutte à goutte actuellement en service a des goutteurs trop espacés (tous les mètres sur rampes espacées de 1,50 mètre) ; les profils racinaires montrent en effet des zones mouillées très restreintes et peu profondes (30 cm), localisées juste sous les goutteurs (ENILORAC, 1986).

Sur de tels sols à argiles gonflantes à forte capacité d'échange, la qualité de l'eau d'irrigation est primordiale. Il ne doit pas y avoir d'ions sodium sous peine d'alcalisation progressive avec dégradation physique irréversible. L'eau de l'Etang de St Paul, avec une conductivité de 500 à 1 000 Nmhos/cm, due aux chlorures, est à prohiber absolument.

En diversification, on peut penser au maïs, à certains arbres fruitiers, tels les manguiers, aux cultures fourragères (Chloris, Panicum,...) en exploitation intensive (fauche).

Un aspect intéressant de ces sols vertiques est que leurs propriétés physiques (porosité, consistance ?) paraissent défavorables à l'installation du vers blanc. Ils n'en contiennent pas, alors que les sols bruns et andiques de la région en sont infestés.

Les alluvions récentes (unités 82 et 83)

Les alluvions récentes, non inondables par les crues, forment l'essentiel des «alluvions à galets» des grands cônes de déjection, en particulier ceux de la Rivière Saint-Etienne (2 500 ha), de la Rivière des Galets (2 200 ha), de la Rivière de l'Est (1 250 ha) et des «Plaines» de Saint-Denis (750 ha).

Modelé

Les cônes les plus vastes et les plus typiques (avec larges bombements transversaux) sont ceux qui s'étalent aux débouchés des cirques pour former des avancées en mer (photo A.13). Ces cônes se sont construits par «balayage» et sur élévation progressive des lits des rivières sur leurs propres remblais.

Le lit majeur, encastré dans le cône, aire de divagation des «lits mineurs» (alluvions actuelles) est inondable pendant les forts cyclones. Il possède une largeur de 200 à 500 mètres au débouché amont (fort encaissement) et de 1000 à 1 500 mètres en aval (faible encaissement).

Les génératrices des cônes ont des pentes relativement fortes, avec en moyenne

- Rivière de l'Est: 6 %,
- Rivière des Galets : 3 %,
- Rivière Saint-Etienne : 2,5 %,

– Rivière du Mât: 2,4 %.

La pente particulièrement élevée du cône de la Rivière de l'Est s'explique par le fait qu'il s'appuie, à faible profondeur, sur les coulées du bouclier de la Fournaise dont il suit le pendage (une coulée de basalte récent est intercalée dans des alluvions). D'ailleurs, c'est le seul qui ne forme pas d'avancée en mer, le sapement marin littoral étant plus actif que le remblaiement alluvial.

Des berges «mortes», sous formes d'escarpements de plusieurs mètres, sont des témoins du balayage par déplacements radiaux du lit majeur. Ces escarpements délimitent le cône de balayage le plus récent du lit. Il est la conséquence de la descente du niveau de base relatif, donc de l'augmentation de la «compétence» d'entaille des remblais précédents qui évoluent alors en «terrasses».

C'est sur le cône de la Rivière du Mât et de la Rivière de l'Est que les berges mortes sont les plus hautes (jusqu'à 10-20 mètres). Ces entailles et emboîtements sont très récents car on n'y observe pas encore sur les paliers étagés, de différences significatives d'altération. Les terrasses récentes n'ont donc pas été distinguées comme unités de milieu spécifiques.

La surface des cônes récents est affectée d'une méso-topographie caractéristique, de moins d'un mètre de dénivellation, sous la forme de multiples chenaux de défluence de 5 à 20 mètres de large. Ces chenaux sont bien visibles sur les parties non cultivées des cônes de la Rivière des Galets et de la Rivière Saint-Etienne. Sur la Rivière du Mât et la Rivière de l'Est, ils ont été estompés au bull, lors des aménagements et épierrages (canne à sucre). Les parties «hautes» de la mésotopographie sont plus riches en gros blocs roulés que les chenaux d'écoulement, très superficiellement remblayés par du sable et de plus petits galets.

Les matériaux des cônes de déjection, dont l'épaisseur atteint une centaine de mètres dans leurs parties aval (sauf pour la Rivière de l'Est), sont constitués quasi-exclusivement de sables et galets volcaniques de toutes tailles, mélangés ou superposés (Ration).

Les parties latérales terminales des cônes paraissent être plus riches en sables et galets de tailles moyennes, que les parties amont et centrales, où les blocs de 1 m^3 et parfois plus (Rivière du Mât, Rivière de l'Est surtout) sont fréquents. La plupart du temps, il y a en moyenne 60 à 80 % de galets (en volume). Les éléments ne sont jamais soudés, le sable est toujours meuble («coulant» à l'état sec) et la perméabilité est forte.

Les sols

Il nous faut distinguer les sols «pénévolués» des cônes «au vent» (unité 82), de ceux des cônes «sous le vent» (unité 83). En situation humide, on observe déjà des caractères andiques, ce qui n'est pas le cas en situation sèche.

On peut considérer en gros que la matrice sableuse du matériau alluvial «originel» n'a pas été touchée par l'altération hydrolytique, ni enrichie en matière organique, à partir de :

– 150 cm pour la Rivière du Mât (pluviométrie 3 200 mm),
– 75 cm pour la Rivière Saint-Etienne (pluviométrie 1 000 mm),
– 60 cm pour la Rivière des Galets (pluviométrie 700 mm).

Le tableau 22 résume et compare, en fonction de la pluviométrie, les caractéristiques moyennes principales des sols des grands cônes de déjection de l'île. Cette comparaison est intéressante car on peut considérer que les matériaux d'origine ont sensiblement le même âge et la même composition (excepté peut-être concernant la Rivière de l'Est). Les différences observées ont donc pour causes essentielles les régimes pluviométriques (et secondairement la durée et le mode de culture).

Du point de vue granulométrique : les sols des régions au vent sont nettement plus riches en éléments fins que ceux des régions sèches (en surface 45 % d'argile + limon pour la Rivière du Mât, 25 % pour la Rivière des Galets). La matrice non touchée par l'altération contient 95-100 % de sables.

Le taux de matière organique suit la même variation : 7 à 10 % dans la région «au vent», 3 à 5 % dans la région «sous le vent».

Le pH (eau) est légèrement acide au nord et à l'est (5,8), plutôt neutre à l'ouest (6,3 à 7,0). Le complexe absorbant a une faible capacité d'échange cationique dans le premier cas (9 mé/100 g, saturation 50 à 80 %) alors qu'elle est élevée dans le second cas (20 à 22 mé/100 g, saturation proche de 100 %).

Par contre, les sols des régions arrosées sont plus riches en phosphore total, ceci étant lié à leurs plus grande richesse en matière organique.

Ces différences analytiques sont associées à des différences d'aspect et de comportement physique. Par rapport aux sols de l'ouest, les sols peu évolués andiques du nord-est ont une meilleure stabilité structurale en surface ; d'autre part, ils possèdent une réserve en eau supérieure et une perméabilité moins importante. Ainsi, les sols du cône de la Rivière des Galets (situation la plus sèche) ont une réserve utile (RU) évaluée à 15 mm sur les 50 premiers centimètres (compte tenu des cailloux) et une perméabilité Muntz à saturation de 150 à 300 mm/h. Pour les sols de la Rivière du Mât (région humide), ces valeurs sont respectivement de 40 mm et de 50 à 150 mm/h.

TAB. 9.1 – *Caractéristiques moyennes comparées des sols peu évolués sur «alluvions à galets» des grands cônes de déjection de l'île.*

Moyennes obtenues
sur la terre fine à partir des données de R. DIDIER DE SAINT AMAND (1960) et de P. F. CHABALIER (1989)

	RIVIERE DE L'EST		RIVIERE DU MAT		RIVIERE ST-ETIENNE		RIVIERE DES GALETS	
	0-25 cm	25-50 cm	0-25 cm	25-50 cm	0-25 cm	25-50 cm	0-25 cm	25-50 cm
PLUVIOMETRIE (mm)	4500		3200		1000		700	
MOIS ¡¡SECS¿¿ (< 50 mm)	0		0		4 à 5		6 à 7	
BLOCS DE PLUS DE 1 m^3	+ + + +		+ + +		+ +		+ +	
SABLES GROSSIERS (%) 200-2000 μ			32	54	35	61	55	85
SABLES FINS (%,) 50-200 μ			13	20	20	17	21	9
LIMONS GROSSIERS (%) 20-50 μ			10	8	10	7	10	2
LIMONS FINS (%) 2-20 μ			29	12	19	9	9	2
ARGILE (%) 0-2 μ			16	6	16	6	5	2
MATIERE ORGANIOUE (%)	10		7.5	2,5	5	1,5	3,5	1
AZOTE ( )	5		4		2,8		2	
C/N	13		10		10		10	
PH (eau)	5,6	5,5	5,8	6,0	6,3	6,2	6,8	7,0
PH (Na F)	9,5		8,5		7,8		7,8	
PHOSPHORE ¡¡ASSIMILABLE¿¿ OLSEN (%)	350		350		150		100	
PHOSPHORE TOTAL (%)	2000		1700		1400		1200	
CEC (mé/100g)	6,4		9,0	6	21,0	18	22,0	14
Ca+ + (mé/ 100g)	2,4		6	4	13	10	13	8
Mg+ + (mé/l00g)	1,3		2,5	1,5	6	5	5	2,5
K+ (mé/100g)	0,1		0,2	0,2	0,5	0,4	0,6	0,4
Na+ (mé/100g)	0,1		0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2
SATURATION (%)	50		80		95		95	
RESERVE UTILE EN EAU (mm/50 cm)	50		40		20		15	

Dans tous les cas, entre les galets, les sols sont très friables et sans aucune cohésion en profondeur. En condition d'humidité suffisante (pluies ou irrigation), les racines peuvent pénétrer très profondément, en s'insinuant entre les cailloux.

Qualités agronomiques

La première contrainte est bien sûr l'abondance des galets de toutes tailles en surface et en profondeur. Un épierrage bien fait est toujours nécessaire avant d'envisager une mécanisation totale en canne à sucre. L'état d'avancement de l'épierrage est très variable suivant les zones : c'est sur la rive gauche de la Rivière du Mât (Saint André) que ces travaux sont les plus avancés, jusqu'à l'épierrage fin, permettant le passage de la coupeuse mécanique. Sur la rive droite (Bras-Panon) et sur le cône de la Rivière de l'Est, on n'en est pas encore là, et, au moment de la récolte, seuls les engins de chargement peuvent passer. Ensuite, viennent les alluvions de la Rivière Saint-Etienne (Pierrefonds) où seul, en général, l'épierrage grossier (éléments supérieurs à 25/30 cm) a été réalisé, ne permettant pas la mécanisation. Le cône de la Rivière des Galets est le moins épierré. Seules les petites zones irriguées de Cambaie et de Ravine à Marquet ont bénéficié d'un épierrage grossier. Le reste, non cultivé, est soumis à une forte emprise urbaine et industrielle.

Concernant la technique de l'épierrage fin, elle est maintenant bien au point (bien qu'encore peu utilisée) avec l'épierreuse «kverneland» adaptée par le CEEMAT**??**, qui retire tout ce qui est supérieur à 5 cm, sur 15 cm de profondeur (voir Chap. 6). Bien sûr l'inconvénient de cette technique est qu'elle détruit totalement la structure superficielle, déjà fragile, du sol sableux, rendant celui-ci sensible au tassement par les engins et même à l'érosion sur pente de 3 à 4 %.

La deuxième contrainte de ces sols, est leur faible réserve en eau (tab. 9.1) et leur grande perméabilité. Seules les alluvions de La Rivière de l'Est ne souffrent jamais de déficit. Sur le cône de La Rivière du Mât, la région de Saint-André (Champ Borne) est irriguée sur 1 800 hectares. Avec un déficit climatique annuel de 100 mm environ, les besoins sont limités à une irrigation d'appoint en octobre, novembre et décembre. Cette amenée d'eau (prise sur la Rivière du Mât) sert à la canne à sucre et au maraîchage.

Les sols du cône de la Rivière Saint Etienne sont irrigués par les réseaux du Bras de La Plaine et du Bras de Cilaos. Sur le cône de la Rivière des Galets, seuls sont irrigués (aspersion), sur la rive droite, le petit périmètre de la Ravine à Marquet (200 hectares), et sur la rive gauche, le périmètre de Cambaie (200 hectares), en maraîchage, vivrier et arboriculture.

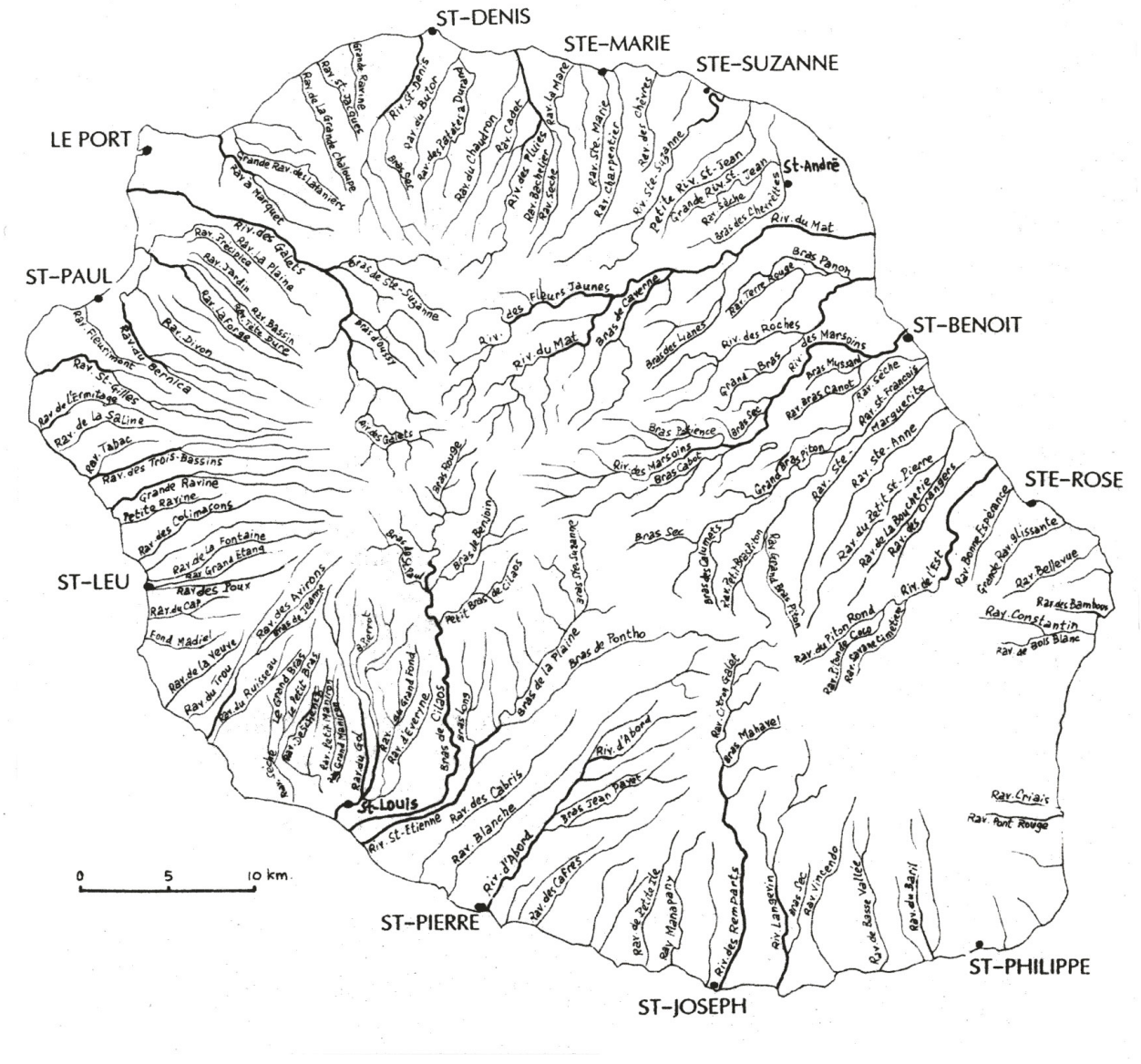
Du point de vue fertilité chimique, les sols des alluvions à galets sont plus intéressants sur la face ouest que sur la face est. Ceux de la Rivière du Mât et de la Rivière de l'Est sont modérément acides (pH 5,5 à 5,8), mais le chaulage n'y est pas vraiment nécessaire. Dans l'ouest (Rivière des Galets et Rivière Saint-Etienne), les pH de surface sont compris entre 6 et 7. Ces derniers sols, malgré leur teneur inférieure en argile et en matière organique ont des capacités d'échange deux à trois fois plus grandes et plus saturées que ceux du nord-est.

Les alluvions à galets conviennent à toutes les cultures (à condition qu'elles soient irriguées, dans l'ouest). C'est le degré de pierrosité qui commande leur possibilité de mécanisation. L'arboriculture fruitière nous paraît spécialement apte à exploiter ces sols pierreux. Les cultures maraîchères prisent également ces sols légers et drainants. Dans l'ouest, la vigne (essais IRFAA.3 pourrait y donner de bons résultats.

9.1.2 Les alluvions actuelles (unité 84)

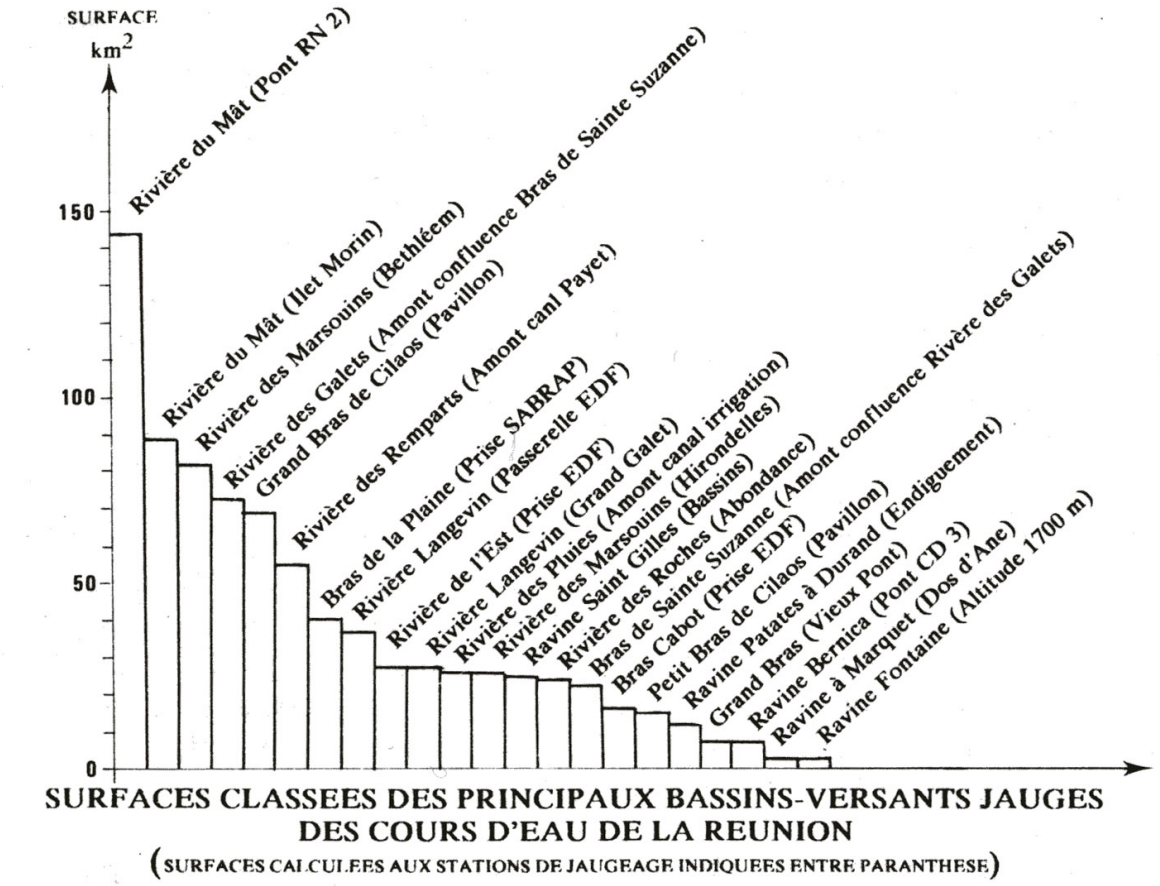
Ce sont les sables et galets des lits majeurs des cours d'eau (Fig. 9.2 et Fig. 9.3). Sur les grands cônes de déjection, ils occupent une superficie non négligeable, environ 1 400 hectares, dont :

FIG. 9.2 – *Le réseau hydrographique*



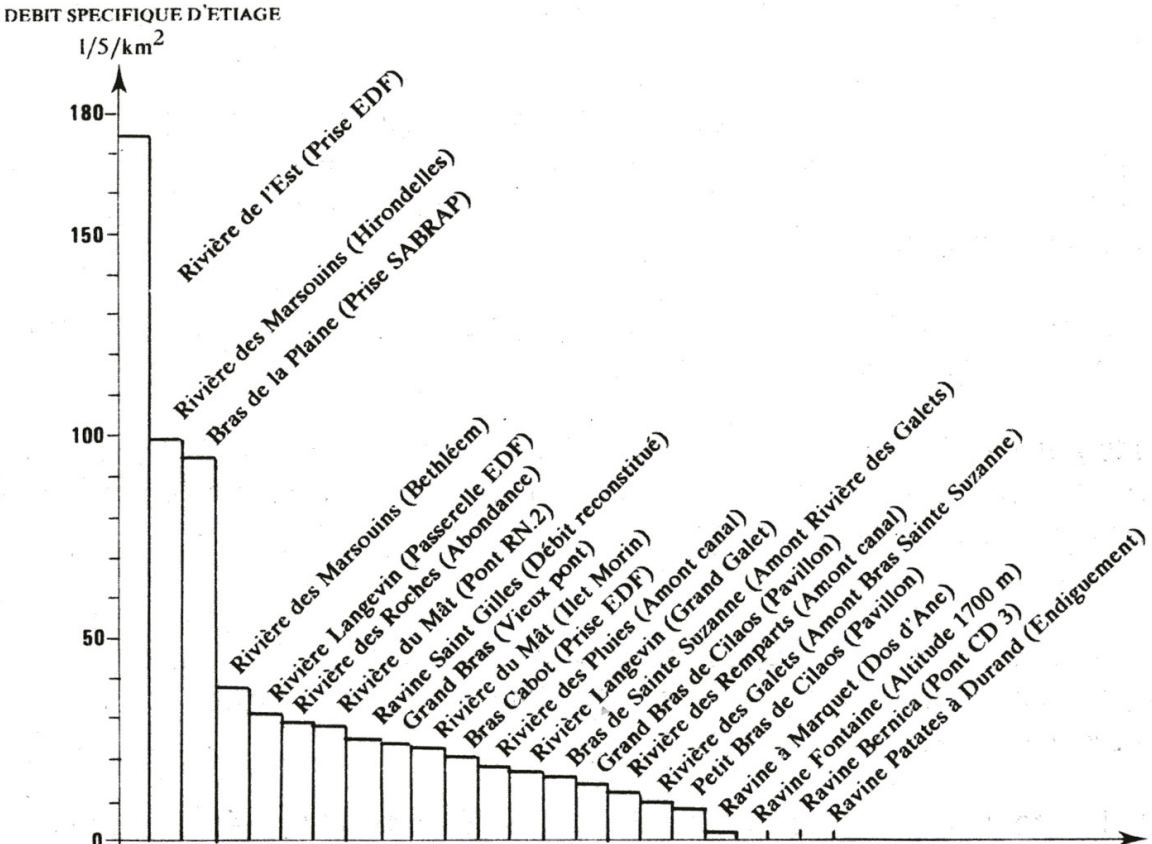
(.jpg)

FIG. 9.3 – *Comparaison des surfaces et des débits spécifiques d'étiage des bassins versants des principaux cours d'eau de la Réunion*



SURFACES CLASSEES DES PRINCIPAUX BASSINS-VERSANTS JAUGES DES COURS D'EAU DE LA REUNION

(SURFACES CALCULEES AUX STATIONS DE JAUGEAGE INDIQUEES ENTRE PARANTHESE)



DEBITS SPECIFIQUES D'ETIAGE CLASSES DES COURS D'EAU DE LA REUNION

(DEBITS SPECIFIQUES CALCULES AUX STATIONS DE JAUGEAGE INDIQUEES ENTRE PARANTHESES)

Les lits majeurs sont les zones de divagation et de défluence des lits mineurs, ceux-ci n'étant pas fixés. La largeur des lits majeurs parait démesurée (plus d'un kilomètre en aval) comparée aux débits habituels des filets d'eau, même en saison des pluies, En fait, il ne se remplissent qu'en période de fort cyclone. Le régime est donc discontinu et catastrophique, du type gigantesque «chasse d'eau», capable de mobiliser les très gros galets.

TAB. 9.2 – *Quelques caractéristiques des principaux torrents de la Réunion*

cours d'eau	longueur (km)	superficie totale b.v. (km^2)	superficie du b.v à la station de jaugeage km^2	pourcentage du bassin supérieur a : 2000 m	1500 m	1000 m	500 m	pluviomètrie moyenne (mm)	module (débit moy. annuel) 1963-1969 (m^3/s)	débit spécifique moyen annuel (l/s/km^2)	crue max. (m^3/s)	débit spécifique de la crue max. (m^3/s/km^2)	debit spécifique d'étiage (l/s/km^2)
RIVIERE DU MAT	35	145	145	9	21	50	88	3300	7,8	54	2600	21	30
RIVIERE DES MARSOUINS	30	109	81	10,7	38	78	81,5	4500	6,9	80	-	-	37
BRAS DE LA PLAINE	17	105	83	5,5	33	65,5	88,5	2200	6,1	58	1600	20	-
BRAS DE CILAOS	26	95	94	13,5	30	64,5	93	3000	3,4	36	1650	17,5	15
RIVIERE LANGEVIN	16	53	36	30	41	72	93.5	3500	25	69	1000	28	32
RIVIERE DES ROCHES	15	65	33,7	2	21	41	79	6000	2,2	89	1000	40	40
RIVIERE DES REMPARTS	23	56	56	18	38	60,5	87	31000	1,5	26	1100	20	10
RIVIERE DES GALETS	33	110	105	4,5	32,5	60,5	91	1850	4.5?	20?	1850	17,5	8
RIVIERE DE L'EST	22	42	39,5	27,5	75,5	86	97	4700	3,5?	280?	1130	28,5	173
RIVIERE SAINT DENIS	15	32	29,6	-	11,4	40,7	79,7	2400	O,5?	17?	700	23	-

Le tableau 9.2 suivant récapitule les caractéristiques principales des régimes hydrologiques des principaux cours d'eau. Ainsi la Rivière du Mât a vu un débit de pointe de 2 600 m^3/s pendant le cyclone de 1944 (soit un débit spécifique de 21 m^3/s/km^2) alors que son débit d'étiage habituel n'est que de 4 m^3/s ! Un tel flot arrive dans un lit de 80 m de large seulement un peu en amont du village de la Rivière du Mât. Cela donne une idée de la violence, de la vitesse et donc de la «compétence» du courant.

En 1944, à cette même période, la Rivière des Galets a eu une crue exceptionnelle de 1 850 m^3/s.

9.2 Les alluvions fines (unités 85 à 88)

Ce sont les remblaiements de décantation, à dominance limoneuse ou argileuse, mis en place par les eaux en conditions peu turbulentes. On les trouve donc dans des situations géomorphologiques particulières qui sont essentiellement :

- les plaines d'ennoyage littorales, situées entre les cônes de déjection à galets et les cordons sableux littoraux,
- les petites plaines isolées par des coulées de lave, piégeant les colluvio-alluvions pyroclastiques cendreuses. On les trouve dans les régions de la Plaine des Cafres et de la Plaine des Palmistes.

9.2.1 Les plaines d'ennoyage littorales (unités 85-86-88)

Les trois ensembles principaux sont situés dans les «angles morts» des trois grands cônes de déjection situés aux débouchés des cirques formant des avancées convexes en mer. Il s'agit de :

- la Plaine de Sainte-Suzanne (575 ha dont 35 en marais), liée au cône de fa Rivière du Mât,
- la Plaine de Saint-Paul (595 ha dont 400 en marais), liée au cône de la Rivière des Galets (photo A.14),
- la Plaine du Gol (650 ha dont 40 en marais), liée au cône de la Rivière Saint-Etienne (photo A.40).

Des cordons littoraux éoliens à sables noir jaunâtre volcaniques se sont ancrés d'un côté sur la côte rocheuse, de l'autre sur les alluvions à galets. Cônes de déjection et cordons sableux ont ainsi isolé de la mer, des plaines qui se sont peu à peu remblayées de colluvio-alluvions issues de l'érosion des cendres et altérations des planèzes amont. Une partie plus ou moins importante est encore en marais (unité 88). Le reste est de bonne qualité pour l'agriculture (unités 85 et 86).

En plus de ces trois grands ensembles existent des cuvettes d'ennoyage de plus petite taille :

- «la Plaine» (75 hectares), encastrée dans l'épandage ancien de Savannah (unité 81),
- la gouttière de l'Ermitage-La Saline (103 ha), isolée de la mer par un cordon littoral de sables madréporiques,
- les petites gouttières de Saint-Leu (16 ha), situées également à l'arrière de cordons de sables coralliens,
- la petite plaine de Sainte-Marie (15 ha), isolée de la mer par un cordon de sables volcaniques, tomme la Plaine de Sainte-Suzanne.
- Les matériaux et les sols

Les plaines sont remblayées par des colluvio-alluvions argilo-limoneuses de couleur brune, de 0,5 à 2 mètres d'épaisseur, reposant sur une semelle de sables ou de galets d'origine plutôt marine. Une nappe phréatique reste le plus souvent à moins de 2 mètres de la surface. Douce en surface, elle peut être saumâtre en profondeur spécialement autour de l'Etang de Saint-Paul et à l'Hermitage.

Ce matériau d'ennoyage fin présente quelques modalités régionales qui sont liées :

- à l'origine et la nature des produits d'érosion fins qui lui ont donné naissance (héritages des bassins versants),
- aux conditions de la sédimentation,
- à l'abondance des pluies,
- à la proximité de la nappe phréatique,
- à la salinité de cette nappe.

Le remblaiement a été alimenté par l'érosion des bassins amont, composés d'un mélange en proportions variables de cendres affectées par la pédogenèse andique (texture limoneuse) et d'argiles issues de l'altération halloysitique des coulées. Ces derniers matériaux sont plus importants à l'aval des bassins constitués de massifs anciens (phase II) à altération ferrallitique. C'est le cas de la plaine du Gol (Fig. 6.6). Au contraire, la plaine de Sainte-Suzanne, remblayée en majorité par des «cendres andiques», est plus limoneuse et présente certaines propriétés des andosols. La périphérie de l'Etang de Saint-Paul est mixte ; ses bassins versants comportent une proportion importante de sols bruns. Le tableau 9.3 compare la granulométrie moyenne des sols de ces trois plaines.

TAB. 9.3 – *Comparaison des granulométries et des Ph des sols d'alluvions des plaines d'ennoyage littorales*

PLAINES	Pédogénèse dominante sur les bassins versants	Argile (0-2 μ)	Limon fin (2-20 μ)	Limon grossier (20-50 μ)	Sable fin (50-200 μ)	Sable grossier (200-2000 μ)	pH
Sainte-Suzanne	Andique sur cendres	30	44	12	8	6	6-6,2
Saint-Paul	Brunifiante sur mugéarites	36	44	15	5	0,4	7-7,5
Gol	Ferrallitique sur basaltes	42	30	15	6	9	6,5-7

De même, les conditions de la sédimentation peuvent être différentes. Ainsi la plaine de Sainte-Suzanne, remblaiement le plus récent, correspond à une décantation très calme en conditions de faible submersion. La nappe y est toujours très proche de la surface (20 à 80 cm de profondeur en général). L'inondation y est encore fréquente par débordement de la rivière Sainte-Suzanne et des rivières Saint-Jean, à méandres peu encaissés. La semelle de galets (fluvio-marins) est peu profonde (moins de 1 mètre). Au-dessus, le matériau limono-argileux est homogène sans lisérés de cailloutis.

Autour de l'étang de Saint-Paul et dans la plaine du Gol, le remblai argileux est plus avancé et est plus épais (1 à 1,5 mètres) ; il montre davantage de passées gravillonnaires, signe d'épandages plus brutaux qu'à Sainte-Suzanne.

- Hydromorphie et salinité

Les rôles de la nappe phréatique et de la pluviométrie sont prépondérants :

– Ainsi à Sainte-Suzanne, l'abondance des pluies et les inondations par les rivières alimentent en permanence la nappe d'eau douce superficielle qui maintient constamment l'eau salée en profondeur sans remontées capillaires. En conséquence, l'hydromorphie des sols est assez générale (sols à gley). Leur couleur est brune, brun grisâtre ou brun jaunâtre. La canne à sucre y souffre fréquemment d'un excès d'engorgement. Le drainage artificiel est peu efficace, la plaine étant à moins de 6 mètres d'altitude et les cours d'eau (rivière Sainte-Suzanne et rivière Saint-Jean) ayant des difficultés d'écoulement vers la mer. Les sols ont 6 à 10 % de matière organique (C/N = 12 à 14) en surface et encore 3 % à 50 cm de profondeur. Leur complexe adsorbant, d'une capacité d'échange de 25 mé/100 g, présente la répartion moyenne suivante : 10 mé Ca++, 3 mé Mg++, 0,4 mé K+, 0,4 mé Na+.

– Entre l'étang et les grandes pentes de Saint-Paul : on observe un gradient d'hydromorphie et de salinité lié à la proximité de la nappe d'eau libre subsuperficielle en bordure de l'étang, la nappe est située vers 1 m 20 en contrebas des coulées qui ont dévalé l'escarpement. Cette nappe est saumâtre, tout comme l'étang qui est insuffisamment alimenté en eaux douces, malgré les nombreuses sources périphériques (la Source du Moulin est salée). L'étang a, en aval (au niveau de la RN), une conductivité électrique de 1 000 à 1 250 gmhos/cm (non utilisable pour l'irrigation). En saison sèche, la conductivité de la nappe phréatique qui imbibe les matériaux fins périphériques peut avoir jusqu'à 800 pmhos/cm. C'est de l'eau saumâtre, riche en ions sodium et magnésium. Les sols de la frange périphérique du marécage, où la nappe fluctue entre la surface et 50 cm de profondeur, présentent un pH de l'ordre de 8 et un complexe adsorbant riche en sodium (4 à 10 mé/100 g), pouvant atteindre jusqu'à 25 % de la capacité d'échange. Ce sont des sols hydromorphes salés de teinte grisâtre. Leur superficie est faible. Au-delà de 150 à 300 mètres de la bordure de l'étang, le remblai argilo-limoneux se surélève progressivement et la nappe, plus profonde, circule et s'adoucit par les apports des ravines amont et des émergences de sources. Les sols, de moins en moins hydromorphes, prennent alors une teinte plus vive (brun rougeâtre). Ce sont d'excellents sols à canne, cultures maraîchères et arboriculture. Ils sont tous intensément cultivés. Les sols du Déboulé et de la plaine, sans aucune trace d'hydromorphie (bien qu'ils soient inondables), sont les plus intéressants. Ils sont épais, sans cailloux, à texture équilibrée, bien structurés et filtrants. Ils ont également de bonnes propriétés physicochimiques : pH 7 à 7,5, capacité d'échange de 25 à 30 mé/100 g, saturation 80 à 90 %. Leur réserve utile en eau est correcte (environ 20 mm/10 cm de sol).

– Dans la plaine du Gol, la nappe phréatique, située entre 1 et 2 mètres de profondeur dans les cailloutis de base, n'est pas salée. Les sols, argileux, conservent une couleur brun rougeâtre, héritage de leur origine ferrallitique. En surface, ils ont un pH de 6,5 à 7 et 3 à 4 % de matière organique. La partie aval de la plaine (au sud de la RN) peut être inondée en période de cyclone. Les sols y sont d'excellente qualité, profonds et non pierreux ; seules la partie centrale et la frange périphérique de l'étang du Gol souffrent d'hydromorphie.

– Dans la petite plaine de l'Hermitage-La Saline : le remblai argilo-limoneux halloysitique (35 à 40 % d'argile), de 20 à 80 cm d'épaisseur repose sur des sables calcaires madréporiques. En profondeur, ces sables sont grésifiés en gros rognons ; la nappe, saumâtre, est située vers 1 mètre de profondeur. Cette gouttière de l'Hermitage est une ancienne lagune faiblement et récemment colluvionnée. Ses sables madréporiques ont livré des restes de squelettes de tortues, faune qui a disparu depuis peu (200 ans ?). La canne à sucre et les cultures maraîchères ont été tentées dans ce secteur, puis abandonnées pour laisser la place à l'urbanisation accélérée.

9.2.2 Les plaines d'altitude à piégeage cendreux (unité 87)

Cette unité de milieu, spécifique de la plaine des Palmistes et de la plaine des Cafres, s'imbrique dans les coulées de la phase IV de la Fournaise. Elle est associée aux unités 55, 57 et 58. Dans ces hautes plaines, à faible déclivité, les coulées de basalte se sont épanchées sans direction dominante, isolant ainsi des gouttières ou larges cuvettes. Par la suite, ces zones dépressionnaires ont été colmatées par des cendres de la Fournaise par retombées directes ou par concentration alluvio-colluvionnaire (photo A.48). Les cuvettes de piégeage forment de multiples petites unités dispersées, de formes et tailles variées (de quelques hectares à 300 hectares). L'ensemble fait à peu près 900 hectares. Les plus étendues se trouvent dans la plaine des Palmistes (Petite Plaine : 125 ha, ouest des 1 er et 2éme villages : 325 ha). La plaine des Cafres en compte une vingtaine, de 3 à 100 hectares, la plus importante étant celle de la Ravine Blanche. Certaines de ces plaines sont incisées sur 1 à 2 mètres et partiellement drainées par de petits cours d'eau qui ont atteint les coulées de substratum.

Le remblaiement colluvio-alluvial fait 1 à 2 mètres d'épaisseur. Il commence souvent par une semelle de cailloutis de 20 à 50 cm. Au-dessus, le matériau brun foncé à beige, d'origine cendreuse, est homogène (sans litation très nette) et friable. Il forme les sols les plus épais des alentours (50 à 150 cm). Par contre, la topographie horizontale et la convergence des eaux de ruissellement périphérique, font que le drainage externe de ces cuvettes est le plus souvent déficient.

Les sols sont des andosols désaturés perhydratés, typiques ou hydromorphes (en cas de substratum à dalle «pahoehoe»), à caractères prononcés de thixotropie. Ils sont riches en matière organique (15 à 20 %) à C/N élevé (15 à 18), le pH est acide (4 à 5 en surface, 4,5 à 5 en profondeur) et le taux d'aluminium échangeable est élevé (3 à 5 mé/100 g).

La vocation de telles zones est la prairie, à condition d'éviter la surcharge bovine qui tasse et déstructure des sols aussi riches en eau, avec pour conséquence la dégradation de cette prairie qui s'enrichit en Cyperus («oumine»).

9.3 Les coulées boueuses «pâteuses» (unités 89 et 90)

Il s'agit essentiellement du vaste lahar «pâteux» et boursouflé, situé de part et d'autre du débouché de la rivière des Galets (environ 300 hectares).

Nous en avons déjà parlé quand nous avons expliqué la mise en place de l'unité 81 (Grand Pourpier et Savannah) qui en est indissociable génétiquement, puisqu'elle constitue l'épandage de la partie fluide de ce même lahar (Fig. 9.1).) Le lahar «pâteux» forme, de chaque côté de la rivière des Galets, une langue de 3 kilomètres de long, haute de 20 à 60 mètres. A part l'entaille en falaise par le sapement de la rivière, son modelé de mise en place d'origine est intact. Il consiste en ondulations avec rides et boursouflures ovoïdes à flancs plus ou moins pentus (Grand Piton par exemple). Ce modelé résulte de la progression rapide d'un matériau argileux riche en eau, mais non liquide. La partie aval de la coulée (actuellement cultivée en canne à sucre) s'est légèrement étalée en perdant de la vitesse, avec création d'un secteur légèrement dépressionnaire (plaine Tamarin, Carré Pierre Noël) ; c'est la seule zone où ont pu se former des sols vertiques assez épais.

Le matériau de la coulée boueuse est constitué de débris rocheux anguleux (brèche) de nature pétrographique et taille hétérogènes (jusqu'à 1 m de large), emballés et faiblement soudés par une matrice argilo-sablogravillonnaire gris brunâtre clair (rappelant un tuf) assurant une certaine cohérence à l'ensemble. L'épaisseur du lahar serait de 50 à 100 mètres au-dessus d'un substratum de coulées de laves (mugéarites). La partie aval est enterrée sous le cône de déjection de la rivière des Galets.

La mise en place a été brutale, probablement suite à la rupture d'un barrage de matériaux détritiques avant la phase de creusement du cirque de Mafate. Nous évaluons son âge à 10 000 à 15 000 ans.

- Les sols

La langue située sur la rive droite de la rivière des Galets ainsi que sur la moitié amont de celle de la rive

gauche forment des rides érodées portant des sols bruns caillouteux peu épais (moins de 40 cm). Le matériau bréchique non altéré sub-affleurant brun jaunâtre à grisâtre devient compact et imperméable à partir de 50 cm de profondeur. L'eau et les racines y passent difficilement. Ces sols, de teinte brun foncé, ont cependant des propriétés physico-chimiques intéressantes : pH 6,5 à 7,5 ; 3 à 4 % de matière organique (C/N = 10) ; capacité d'échange élevée (30 à 40 mé/100 g) ; taux de saturation supérieur à 80 %. Leur structure est bien développée, finement polyédrique, toujours très exploitée par les racines. La végétation est une savane à Heteropogon piquetée de sisal, brûlée en saison sèche par les éleveurs de chèvres. Leur richesse en éléments grossiers, leur faible épaisseur et leur situation sommitale en font des «sols secs», à faible réserve hydrique, utilisables que si on y amène de l'eau.

L'aval du lahar, sur la rive gauche de la rivière des Galets, comporte des pentes faibles et de larges zones faiblement dépressionnaires, où ont pu se former des sols bruns vertiques plus épais, actuellement cultivés en canne à sucre irriguée (aspersion et goutte à goutte). Ces sols sont comparables à ceux du lahar conglomératique plan de la terrasse de Savannah et de Grand Pourpier (unité 81). La différence est que les éléments grossiers y sont anguleux (et non émoussés) et moins nombreux. Leur épaisseur est de 40 à 80 cm au-dessus du matériau bréchique plus ou moins compact. Ils sont très argileux avec 50 à 60 % d'argile et 20 à 25 % de limons fins. Ils possèdent 3 à 4 % de matière organique dans leur horizon supérieur finement polyédrique (grumeleux à l'état humide), brun foncé. Le pH est de 7. La capacité d'échange est élevée (30 à 40 mé/100 g en surface, 25 à 30 mé en profondeur). La structure est large en profondeur et montre des faces de glissement indicatrices d'argiles gonflantes (montmorillonite). Ces sols ont une faible perméabilité (moins de 1 cm/h).

9.4 Les sables littoraux (unités 91,92,93)

Les cordons littoraux sableux bordent une partie du littoral ouest (sous le vent) depuis Saint-Paul jusqu'à Etang Salé. Il s'agit de sables de plage repris par le vent et accumulés en bourrelets dunaires surbaissés parallèles au rivage. Les cordons sont actuellement fixés (Naos, Albizia), mais à une époque récente (début du siècle) ils étaient encore mobiles, en particulier ceux de la région d'Etang Salé très ventée.

Les cordons sont soit à base de sable clair calcaire madréporique (unité 91) issu du plateau corallien (Saint-Gilles à La Saline), soit à base de sable sombre volcanique (Saint-Paul, Etang Salé), soit mixtes (Saint-Leu).

Les sables volcaniques (unités 92 et 93), les plus étendus (1 500 ha) surtout à Etang Salé, sont composés d'un mélange de basalte, andésite, olivine, augite et titano-magnétite. Ils présentent une structure litée entrecroisée à très faible cohésion. Leur couleur d'ensemble est gris foncé à gris verdâtre. La granulométrie moyenne est la suivante : 84 % de sable grossier (200-500 u), 14 % de sable fin (50-200 μ), 1 % de limon grossier (20-50 μ), 1 % d'argile plus limon fin (0-20 μ).

En surface, ils ne présentent aucune altération hydrolytique. Sous végétation forestière de filaos, les 10 centimètres supérieurs, de couleur brun rougeâtre foncé, riche en aiguilles et racines, présentent une structure polyédrique émoussée très fragile. Il y a dans ce cas, 5 à 9 % de matière organique à C/N élevé (14 à 15). Le pH est de 6,5 et la capacité d'échange de 25 mé/100 g (saturation 90 %). Sous culture, le taux de matière organique baisse rapidement à 3 % et la capacité d'échange à 10 mé/100 g. En profondeur, le pH est de 7 à 7,3 et la capacité d'échange de 3 à 5 mé/100 g. Ces sols sont excessivement filtrants et possèdent une faible capacité de rétention en eau. S'ils sont cultivés, ils demanderont une irrigation permanente de faible débit, du type goutte à goutte. Les brise-vent seront nécessaires pour protéger les cultures des embruns salés et éviter la remise en mouvement des sables. Leur meilleure utilisation reste leur couverture forestière (Casuarina, Albizia..).

Chapitre 10

CONCLUSION

Nous avons tenté au cours de cette étude de montrer ce que le milieu physique et les sols de l'île pouvaient offrir comme possibilités agricoles. Le tableau 10.1 récapitule les superficies des unités de milieu.

TAB. 10.1 – *Superficies des unités de milieu*

N °	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ha	1000	1000	5000	4000	18000	500	2500	150	200	550	100	100
No	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ha	475	500	600	925	3500	500	1000	1700	500	1600	500	250
No	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
h a	700	350	80	4600	2400	2000	800	4000	10000	2500	7500	2400
No	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
h a	2300	3100	1600	400	800	2300	500	600	500	860	2300	7200
N °	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
ha	2700	2900	2700	130	4300	5100	1950	300	1650	120	800	725
No	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
ha	400	1000	6800	1100	9880	3100	920	415	50	910	345	1635
No	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
ha	220	1610	665	110	2240	11000	500	1100	300	5600	4100	1400
No	85	86	87	88	89	90	91	92	93			
ha	860	890	900	400	250	40	360	310	1240			

	escarpements et ravines	cônes de scories
ha	58015	3500

TOTAL - 251 000 ha

Les contraintes ont été identifiées et décrites. Les façons de s'y adapter ou de les lever ont été exposées.

Mais nous avons insisté sur les limites à ne pas dépasser pour que ce potentiel soit maintenu.

Diversité et fragilité peuvent résumer la situation.

Il a été montré également pourquoi la biodiversité végétale, encore exceptionnelle, malgré les atteintes qu'elle a déjà subies, devait impérativement être préservée. A cet égard, la limite domaniale devrait constituer une frontière à ne pas dépasser pour les activités agricoles.

Il est ressorti aussi le fait que les alternatives de production agricole en fonction des caractéristiques des types de milieu étaient relativement variées. La plupart du temps, on ne peut pas parler de «vocation culturale» au sens univoque du terme.

Il est en effet difficile, à la Réunion, de s'affranchir du poids socioéconomique et politique et de ne tenir compte que du milieu physique.

L'évolution agricole future est ouverte ; elle n'est pas linéaire et prévisible à partir de la situation actuelle que l'on se contenterait de prolonger en l'améliorant. Des bifurcations et changements importants peuvent survenir, par exemple concernant la production sucrière, le géranium ou l'élevage, l'introduction de cultures nouvelles à haute valeur ajoutée après transformation ; les pôles régionaux de production pourront se déplacer en fonction des nouvelles possibilités offertes par les innovations techniques et l'ouverture du vaste périmètre hydro-agricole, que constitueront dans quelques années les basses et moyennes pentes de l'Ouest.

Beaucoup de surfaces sucrières actuelles sont susceptibles, dans l'avenir, d'être reconverties, surtout sur les façades ouest et est, dans les zones difficilement mécanisables du fait de leurs pentes, de leur forte pierrosité ou de leur faible portance. Ces sols, actuellement peu exposés à l'érosion grâce à leur couverture quasi permanente, risquent d'être brutalement fragilisés s'ils sont affectés à des productions plus «agressives». Il faudra donc être très vigilant.

Du point de vue strictement pédologique, la spécificité de l'île est indéniablement la couverture d'andosols sur cendres volcaniques, qui représentent environ 2/3 de sa surface agricole.

Une partie importante de l'exposé a été consacrée à l'étude de ces sols à propriétés très particulières interdépendantes, qu'elles soient hydriques, physiques, mécaniques, chimiques, biologiques et donc naturellement agronomiques. Il y a des contraintes d'ordre nutrition minérale (forte rétention du phosphore et faible minéralisation azotée) ; en altitude, les pH fortement acides induisent des toxicités aluminiques (et peut-être manganiques). Dans les zones les plus pluvieuses s'ajoutent des propriétés de thixotropie qui occasionnent des problèmes de portance pour les engins agricoles.

Enfin, l'aspect le plus préoccupant est leur sensibilité à l'érosion qui résulte de leurs propriétés hydro-mécaniques, accentuées par des pentes le plus souvent fortes. C'est un défi important pour la recherche agronomique (MAT (**??**), IRFA (A.3), CEEMAT (A.3), IEMVT (A.3)), qui se doit de proposer des systèmes de cultures qui protègent efficacement ces sols.

La mise au point de chaînes de mécanisation, adaptées aux différents systèmes de culture, filières de production et unités de milieu, va également dans le même sens. La pénurie de main-d'oeuvre exige en effet de plus en plus l'introduction de la mécanisation dans les exploitations. La difficulté réside à trouver un compromis entre ce qui est possible techniquement, ce qui est souhaitable pour la protection du milieu et ce qui est admissible du point de vue socio-économique.

L'aspect foncier (taille et forme des exploitations, mode de faire-valoir...) est encore fort contraignant. La SAFER (A.3) et les structures coopératives (SICA (A.3), CUMA (A.3)) jouent un rôle très important dans cette évolution.

Les structures d'encadrement telles que SUAD (A.3), APR (A.3), SAPHIR (A.3), sont également essentielles en tant que relais entre milieu rural, recherche agronomique et milieu physique.

Il est à souhaiter une meilleure coordination des travaux d'amélioration foncière tels qu'épierrages, défrichements, dessolages, travaux du sol. Les opérateurs directs de ces travaux (REDETAR (A.3), SICA (A.3), CUMA (A.3)...) devraient être plus sérieusement contrôlés (jusqu'aux chauffeurs d'engins) concernant l'opportunité des travaux, les époques souhaitables, les réalisations pratiques, etc. En effet, les travaux trop brutaux et trop rapides, loin de conduire à une amélioration, peuvent décaper et stériliser le sol, l'exposer à une érosion accélérée. Dans beaucoup de cas, les défrichements manuels et le travail minimum du sol sont préférables aux passages de bulls et tracteurs. Les modalités d'attribution des subventions sont peut-être à reconsidérer.

Une conclusion générale concerne également le rôle de l'élevage à la Réunion. Les considérations d'ordre climatique et morpho-pédologique confirment et renforcent l'idée que les prairies d'exploitation extensive ou

intensive devraient y prendre de plus en plus de place :

- soit en tant que «pivot» des exploitations, en particulier dans les «hauts» à partir de 1 400 mètres d'altitude mais peut-être aussi dans les zones basses et moyennes les plus humides, entre Saint-Benoît et Piton-Sainte-Rose ainsi qu'à la plaine des Palmistes, régions qui conviennent mal aux productions sucrières, vivrières et fruitières ;
- soit dans les rotations et assolements dans les hauts entre 600 et 1 400 mètres d'altitude (hauts de l'ouest et du sud). Dans cette zone, les prairies faisant partie des systèmes de culture auront un rôle important sur la protection et la régénération des sols ainsi que pour la fourniture de fumier, élément indispensable à l'amélioration du statut organique et microbiologique des andosols.

Le fumier apparaît en effet de plus en plus comme une composante essentielle de la conservation et de l'amélioration de la fertilité des sols à la Réunion. Ceci d'autant plus que d'autres sources de matière organique que sont les sous-produits des sucreries sont en régression, avec les fermetures d'usines. La recherche agronomique (CIRAD (A.3), INRA (A.3), ITEB (A.3)) devra donc s'orienter peut-être davantage vers l'extension et l'amélioration de l'élevage dans les différentes écologies de l'île (races adaptées, nutrition, production...) ; le domaine des cultures fourragères (IEMVT (A.3), IRAT (A.3)) installation, entretien, exploitation et mécanisation des prairies (CEEMAT (A.3)) devra donc être privilégié.

Un axe de recherche également très important nous paraît concerner la mise en valeur des périmètres irrigués du sud et de l'ouest : besoins en eau des cultures, gestion rationnelle et économique de l'eau et des fertilisants, systèmes culturaux, calendriers, mécanisation, protection anti-érosive, etc. Cette région présente les sols parmi les plus intéressants de l'île ; c'est le vaste ensemble des sols bruns, non acides, à bonne fertilité chimique ; les bonnes conditions pédo-climatiques devraient permettre, en irrigué, d'augmenter fortement les rendements et donc de valoriser l'amenée d'eau.

Les sols, souvent peu épais, caillouteux et en pentes demanderont cependant des précautions anti-érosives particulières. Toutes les pentes ne devront pas être défrichées et mises en culture ; l'épierrage au bull ne devra pas être systématique et devra être bien contrôlé, ce qui n'est pas toujours le cas actuellement. En plus des risques de pertes en terre, la pollution du lagon pourrait alors être définitive. La diversification des cultures (arboriculture, maraîchage, vivrier, fourrages, canne...) devrait être raisonnée en fonction des pentes, de la pierrosité, de la texture, de l'épaisseur variables des sols. Ceci au niveau des unités de milieu comme au niveau des exploitations. Ainsi, des pôles régionaux à dominante canne à sucre, maraîchage, arboriculture ou autre, pourront émerger en intégrant la composante morpho-pédologique. Chaque exploitation pourrait de son côté tenir compte davantage de ces mêmes particularités physiques.

Pour cela un «comité d'aménagement des terres irriguées» pourrait être créé; il aurait autorité et compétence pour conseiller, spécifier et contrôler les travaux d'aménagement, proposer et poursuivre des plans d'assolements, guider l'allocation des subvention, etc. L'important est qu'il n'y ait pas de «rupture» dans la filière «évaluation - réalisation - suivi». Une telle autorité devra avoir dans son «noyau dur» un expert «érosion» permanent. Elle pourrait s'inspirer de l'exemple du commissariat à l'aménagement des hauts et de l'action de l'APRA.3 avec son délégué «érosion» pour la zone géranium. Une telle structure devra s'appuyer sur des travaux de recherche, à renforcer dans l'ouest, axés sur ces problématiques spécifiques de mise en valeur de gestion de l'eau et de protection des zones irriguées.

Annexe A

Annexe

A.1 Photos

A.1.1 LE DOMAINE FORESTIER

FIG. A.1 – *Photo 1 :* ***Hauts du Nord :*** *plaine des Fougères. Forêt hygrophile mésotherme à «bois de couleur». Nombreux épiphytes.*

(.jpg)

FIG. A.2 – *Photo 2 :* ***Hauts du Nord :*** *«Plaine des Chicots». Forêt hygrophile mésotherme à tamarins, calumets. Philippia et fougères arborescentes.*

(.jpg)

FIG. A.3 – *Photo 3 :* ***Hauts de Ste Marie/Ste Suzanne (nord de l'île) :*** *défrichement dans la forêt à jam-rosats et à «bois de couleur». Andosols perhydratés, pentes fortes.*

(.jpg)

FIG. A.4 – *Photo 4 : Une des pestes les plus menaçantes pour la végétation naturelle la vigne marrone (Rubus alcafolius).*

(.jpg)

FIG. A.5 – *Photo 5 :* ***Hauts du Nord :*** *forêt à bois de couleur goyaviers et fougères arborescentes.*

(.jpg)

FIG. A.6 – *Photo 6 :* ***Est de l'île : Mare Longue*** *forêt hydrophile à «bois de couleur» desbas, riches en «petits nattes», «grands nattes» «bois maigre», «bois de fer blanc» «bois de cannelle», etc...*

(.jpg)

FIG. A.7 – *Photo 7 : **La** «**mer de nuage**» plafonnée ici vers 1600 mètres d'altitude. Ce plafond dépend de l'épaisseur de la couche d'alizés humides. Il explique un maximum pluviométrique sur les flancs externes situé entre 1400 et 1600 mètres d'altitude. Au dessus, la pluviosité diminue et l'ensoleillement remonte.*

(.jpg)

A.1.2 LE DOMAINE DE HAUTE ALTITUDE

FIG. A.8 – *photo 8 :* ***Lande des Hautes altitudes (Plateau Langevin)*** *: lande à branles (Philippin, Stoebe...). Au loin : la Plaine des Cafres puis le Piton des Neiges et le Grand Bénard.*

(.jpg)

FIG. A.9 – *photo 9 :* ***Lande de haute altitude au Piton des Neiges*** *(Coteau Kerveguen), environ 2100 mètres d'altitude : dominance de branles (Philippin. Stoebe). Prairie altimontaine dans cuvette mal drainée, riche en graminées.*

(.jpg)

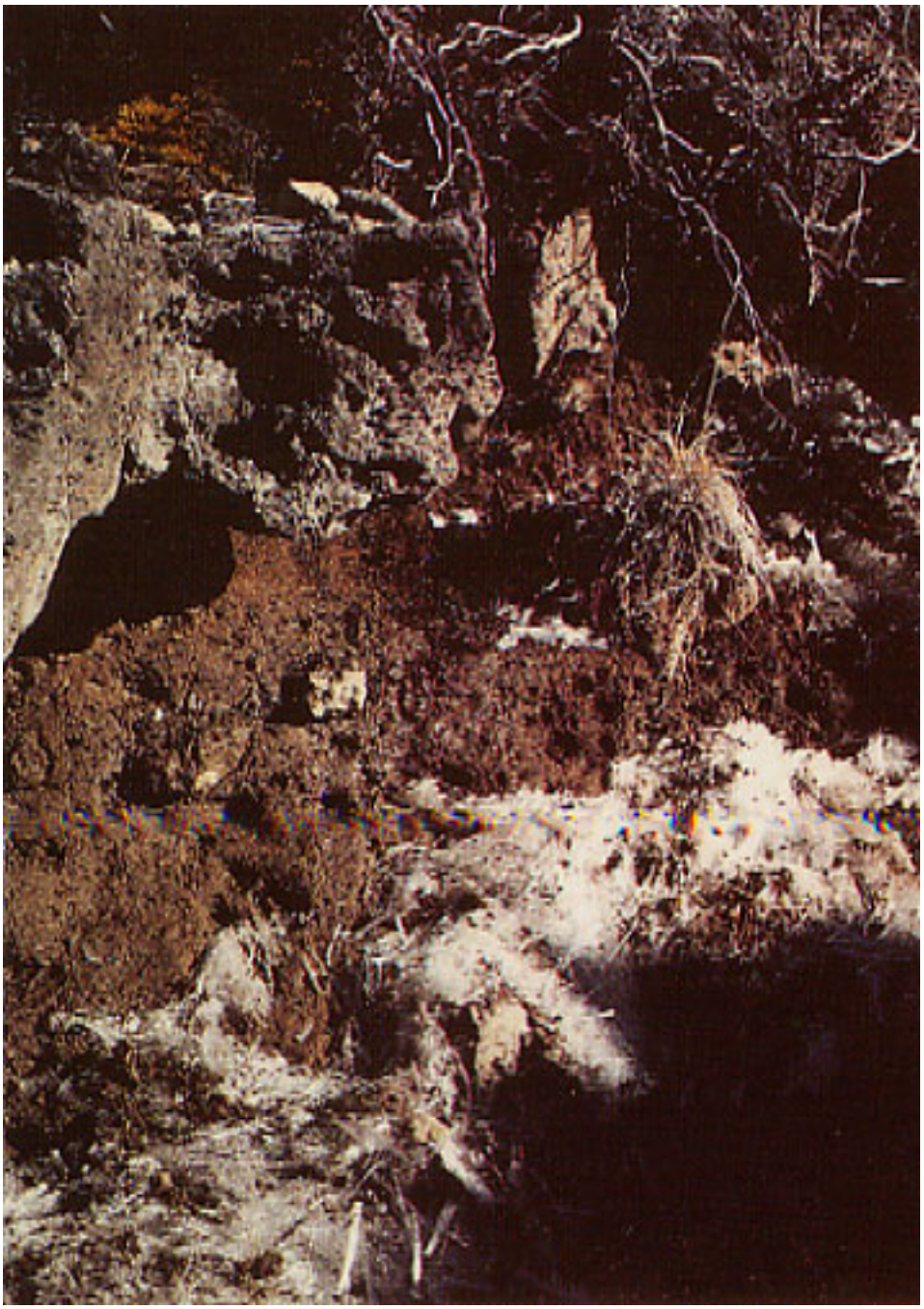
FIG. A.10 – *photo 10 :* ***Haute altitude - Massif de La Fournaise (Bellecombe)*** *: andosol podzolique sur cendres et lapilli. à litière très acide (Philippin). Horizon placique d'accumulation ferrugineuse au contact avec la coulée sous-jacente.*

(.jpg)

FIG. A.11 – *photo 11 :* ***Haute altitude - Plateau Langevin*** *figures pseudo-karstiques de dissolution du basalte par voie bio-chimique sous litière très acide issue de Philippia. Cannelures et vasques (lapiez) visibles après l'érosion de la litière sur lapilli.*

(.jpg)

FIG. A.12 – *photo 12 :* ***Très haute altitude (plus de 2500 mètres)*** *perhydratation dans un andosol sur cendres, causant localement des glissements et reptations par gélifluxion.*



(.jpg)

FIG. A.13 – *photo 13 :* ***Ouest de l'île*** *: cône de déjection de la Rivière des Galets. Ville du Port. A gauche, l'Etang de St-Paul.*

(.jpg)

A.1.3 LE LITTORAL OUEST

FIG. A.14 – *photo 14 :* ***Région Ouest - Etang de St-Paul*** *: végétation sub-aquatique riche en Papyrus (Ilots ronds) et Typha. Au fond, ancienne falaise littorale nappée de coulées des phases III et IV. Au-dessus, en fourré semi-xérophile, sols bruns ferruginisés peu épais. La canne ne commence que vers 300 mètres (au loin) sur sols bruns plus épais. Sans irrigation, fort déficit hydrique.*

(.jpg)

FIG. A.15 – *photo 15 :* ***Cirque de Mafate, près de la sortie*** *: à gauche. Rivière des Galets. A droite, vaste affaissement (Ilet Cambour). Au fond. crête d'Aurère et crête de La Marianne.*

(.jpg)

FIG. A.16 – *photo 16 :* ***Ouest de l'île*** *: plantation de savanna, installée sur terrasse ancienne de coulée boueuse, à sols bruns vertiques. Grandes parcelles séparées par les andains d'épierrage. Irrigation au goutte à goutte. Au fond, coulées des phases IlI et IV fossilisant une ancienne falaise littorale.*

(.jpg)

FIG. A.17 – *photo 17 :* ***Les planèzes de la zone sèche de l'île****.De gauche à droite : bande littorale à pentes faibles à Heteropogon - pierriers et vertisols, - escarpement tectonique (fin de la phase II) moulé par les coulées des phases III et IV, à fourré semi-xérophile - sols bruns ferruginisés, - «plateau» incliné bosselé cultivé en canne à sucre sans irrigation (fort déficit hydrique) - sols bruns.*

(.jpg)

FIG. A.18 – *photo 18 :* ***Basses pentes du littoral ouest****: savanne herbeuse sema-aride à Heteropogon sur pierriers de coulées affleurantes (phase IV) ; rares poches de vertisols.*

(.jpg)

A.1.4 LE LITTORAL OUEST

FIG. A.19 – *photo 19 :* ***Les basses pentes de l'ouest semi-aride*** *ravine des Trois-Bassins. Savanne herbeuse sèche à Heteropogon puis escarpement tectonique à fourré semi-xérophile (Leucaena, Phitecellobium, Albizia, Schinus, Dichrostachys).*

(.jpg)

FIG. A.20 – *photo 20 :* ***Basses pentes de l'ouest (Bois de Nèfles)*** *épierrages grossiers sur sols bruns et mise en andains.*

(.jpg)

FIG. A.21 – *photo 21 :* ***Littoral ouest (Pointe des Chateaux)*** *sol fersiallitique brun-rouge à tendance vertique sur coulées ˚ pahoehoe de la phase III (roche pintade).*

(.jpg)

FIG. A.22 – *photo 22 :* ***Ouest de l'île - Région de Grand-Fond Boucan-Canot*** *collines au premier plan et au fond : «tufs» de Saint-Gilles (phase II) ; au centre : coulée de vallée de la phase IV en inversion de relief au dessus de la gouttière de Boucan-Canot. Cultures irriguées par le Canal Prune (Ravine St-Gilles) arboriculture en terrasses sur sols bruns peu épais, maraichage sur sols vertiques dans la gouttière, canne et maraichage sur vertisols de la coulée de vallée*

(.jpg)

FIG. A.23 – *photo 23* ***Ouest de l'île - Région de Piton St-Leu*** *: épierrage grossier au bulldozer. Rippers de deroctage à l'arrière. Rateau «Fleco» à l'avant pour mise en andains.*

(.jpg)

FIG. A.24 – *photo 24* ***Région ouest sub-littoramle (aval de Piton St-Leu*** *: zone récemment défrichée et épierrée sur sols fersiallitiques (coulées de phase III). Semis de haricots sous plastique dans le sens de la pente (environ 12%). Irrigation au goutte à goutte. Risques importants d'érosion sur sol non couvert*

(.jpg)

FIG. A.25 – *photo 25* ***Littoral ouest (entre St-Leu et Etang Salé)*** *: vertisol sur coulées de la phase IV*

(.jpg)

A.1.5 LES HAUTS DE L'OUEST

FIG. A.26 – *photo 26 :* ***Ouest de l'île, structure des propriétés*** *lanières étroites séparées par des ravines. Héritage de la Compagnie des Indes (concessions «du Battant des lames au sommet des Montagnes»).*

(.jpg)

FIG. A.27 – *photo 27 :* ***Hauts de l'Ouest (vers 1400 mètres d'altitude)*** *prairies à kikuyu sur andosols perhydratés, installées sur vieilles jachères à Acacia decurrens.*

(.jpg)

FIG. A.28 – *photo 28 :* ***Zone ouest vers 800 mètres d'altitude*** *andosol non perhydraté sur cendres du Piton des Neiges.*

(.jpg)

FIG. A.29 – *photo 29 :* ***Moyennes pentes de l'Ouest*** *: récolte mécanique de la canne à sucre sur pentes de 10 %. Au-delà de 12 %, le tracteur et sa remorque pour le chargement ne passent plus.*

(.jpg)

FIG. A.30 – *photo 30 :* ***Versant Ouest de l'Ile*** *: la Grande Ravine (près de Trois-Bassins). De part et d'autre, champs de canne sur sols bruns, bruns andiques puis andosols (de gauche à droite).*

(.jpg)

FIG. A.31 – *photo 31 :* ***Hauts de l'Ouest (vers 900 mètres d'altitude)*** *: limite supérieure de la canne, début du géranium. Plantations en lignes et cordons anti-érosifs à canne fourragère.*

(.jpg)

FIG. A.32 – *photo 32 :* ***Hauts de l'Ouest (1100 mètres)*** *: cultures associées intercalaires (maïs, géranium, haricot), sur andosol non perhydraté.*

(.jpg)

A.1.6 LES HAUTS DE L'OUEST

FIG. A.33 – *photo 33 :* ***Hauts de l'ouest (1650 mètres d'altitude)*** *andosol perhydraté podzolique à «mascareignite» (horizon clair supérieur).*

(.jpg)

FIG. A.34 – *photo 34 :* ***Hauts de l'Ouest (1600 mètres d'altitude)*** *défrichement sur andosols perhydratés podzoliques à «mascareignite», pour l'installation de prairies. Sol extrêmement acide et érodible.*

(.jpg)

FIG. A.35 – *photo 35 :* ***Hauts de l'Ouest :****chaulage sur andosols perhydratés, avant l'installation de prairies.*

(.jpg)

FIG. A.36 – *photo 36 :* ***Hauts de l'Ouest (1600 mètres d'altitude)*** *: litage de pyroclastites (cendres et tufs) du Piton des Neiges (phase V).*

(.jpg)

FIG. A.37 – *photo 37 :* ***Hauts de l'Ouest - Zone*** «***géranium***» *: plantation traditionnelle clairsemée sur pentes fortes exposées à l'érosion. Au fond, ancienne jachère à Acacia decurrens.*

(.jpg)

FIG. A.38 – *photo 38 :* ***Hauts de l'Ouest - Zone*** «***géranium***» *: érosion sur andosol excessivement travaillé ; décollement et départ de l'horizon travaillé au dessus du «B» non travaillé (discontinuité).*

(.jpg)

FIG. A.39 – *photo 39 :* ***Hauts de l'Ouest - Région de Trois Bassins*** *: géranium planté en ligne, avec cordons anti-érosifs à canne fourragère.*

(.jpg)

FIG. A.40 – *photo 40 :* ***Sud Ouest de l'île****, La plaine du Gol : plaine fluvio-marine à alluvions argileuses, isolée de la mer par un cordon sableux (au premier plan).*

(.jpg)

A.1.7 LE SUD-OUEST

FIG. A.41 – *photo 41 :* ***Sud de la Plaine des Makes (sud-ouest de l'île)*** *: à gauche, reliefs très disséqués dans la phase II du Piton des Neiges (massif du Bras de la Ravine Goyave). Au premier plan et à droite : planèzes des phases III et IV dévalant vers la mer après avoir fossilisé l'effondrement de la Plaine des Makes.*

(.jpg)

FIG. A.42 – *photo 42 :* ***Sud-Ouest de l'Ile*** *: Au fond, reliefs de dissection dans la phase II du Piton des Neiges (Massifs du Zèbre et du Dimitile). Au premier plan, amont de la plaine de l'Entre-Deux : gouttières d'effondrement/glissement à matériaux détritiques. Région agricole diversifiée (canne, légumes, arboriculture, jardins floraux...;*

(.jpg)

FIG. A.43 – *photo 43 :* ***Littoral Sud-Ouest - Région de Ligne Paradis*** *: Sol brun peu épais très caillouteux sur coulées en «gratons» de la phase IV du Piton de la Fournaise.*

(.jpg)

FIG. A.44 – *photo 44 :* ***Sud-Ouest de l'Ile, entre Les Avirons et Etang-Salé*** *: vergers (cocotiers et manguiers) irrigués au goutte à goutte, sur sables éoliens basaltiques (plaqués sur coulées de phase III du Piton des Neiges).*

(.jpg)

FIG. A.45 – *photo 45 :* ***Sud-Est de l'Ile : région agricole diversifiée*** *(maraîchage, canne, arboriculture). Au premier plan, flac est du Rosile, à andosols vitriques chromioques sur lapilli.*

(.jpg)

FIG. A.46 – *photo 46 :* ***Centre de l'île - Région de Piton Hyacinthe*** *: zone de maraichage intensif sur andosols perhydratés vers 1000 mètres d'altitude.*

(.jpg)

A.1.8 LES HAUTS DU CENTRE

FIG. A.47 – *photo 47 :* ***Région Sud-Ouest, Hauts du Tampon*** *: pâturage sur andosols perhydratés (sur cendres du Piton des Neiges). Topographie bosselée caractéristique des coulées de laves, moulées par les pyroclastites épaisses.*

(.jpg)

FIG. A.48 – *photo 48 :* ***Hauts de La Plaine des Cafres*** *: prairies sur piégeages cendreux à andosols perhydratés, entre les affleurements de coulées en «gratons» de la phase IV de La Fournaise. Au fond, versants de la phase I à manteau cendreux plus épais.*

(.jpg)

FIG. A.49 – *photo 49 :* ***Versants Ouest du Massif de La Fournaise*** *: phase I (à recouvrements cendreux du Piton des Neiges) fortement disséquée et Plaine des Cafres (phase IV de La Fournaise à saupoudrage cendreux peu épais), non entaillée.*

(.jpg)

FIG. A.50 – *photo 50 :* ***Plaine des Palmistes*** *: fourré hygrophile à Pandanus montanus, Machaerina iridifolia («herbe sabré»), fougères aquatiques, etc... Andosol perhydraté hydromorphe sur cendres de La Fournaise à substrat peu perméable (dalle «pahoehoe»).*

(.jpg)

FIG. A.51 – *photo 51 :* ***Sud de l'île - Plateau de Grand-Coude*** *: basaltes de la phase 2 de La Fournaise matelassés de cendres du Piton des Neiges. Andosols perhydratés. Zones consacrées aux prairies (1200 mètres d'altitude). Au fond, Ravine de la Rivière des Remparts.*

(.jpg)

FIG. A.52 – *photo 52 :* ***Les planèzes du flanc Nord du Piton des Neiges*** *(Hauts de Ste-Marie/ Ste-Suzanne) : dissection en lanières étroites par des ravines sub-parallèles. Topographie bosselée à recouvrement cendreux (andosols). Canne à sucre jusque vers 600 mètres. Forêt secondaire à goyaviers et jam-rosats, puis forêt hygrophile mésotherme à «bois de couleur» au dessus (mitée par des prairies récemment installées).*

(.jpg)

A.1.9 LE NORD

FIG. A.53 – *photo 53 :* ***Nord de l'île - Région de Ravine des Chèvres*** *: grandes exploitations sucrières sur «terres franches» (sols ferrallitiques et ferrallitiques andiques). Pentes faibles et dissection peu serrée.*

(.jpg)

FIG. A.54 – *photo 54 :* ***Nord de l'île, St-Denis****, route de ONFA.3 : altérites et sol ferrallitique sur basalte de la phase II du Piton des Neiges. Altération en «pelures d'oignon».*

(.jpg)

FIG. A.55 – *photo 55 :* ***Nord de l'île - Rivière des Pluies*** *: radier emporté par la crue lors du cyclone Hyacinthe (janvier 1980).*

(.jpg)

FIG. A.56 – *photo 56 :* ***profil typique d'une ravine*** *creusée dans les coulées de la phase IV du Piton des Neiges. Succession de replats, escarpements et vasques (bassins).*

(.jpg)

FIG. A.57 – *photo 57 :* ***Nord-Nord-Est de l'île : rivière du Mât*** *à sa sortie du Cirque de Salazie (au fond). A gauche : reliefs de dissection dans la phase II du Piton des Neiges (Morne du Bras des Lianes). Au centre et à droite : coulées terminales du Piton des Neiges (phase VI), sans recouvrement cendreux. Au centre-droit : la Ravine Sèche scellée par une coulée de vallée de la phase VI.*

(.jpg)

FIG. A.58 – *photo 58 :* ***Cirque de Cilaos vu du Sommet du Piton des Neiges*** *- en bas : Ilets du Petit Matarum, du Grand Matarum, de Cilaos, de Mare à Joseph, de Bras-Sec. - à gauche : le coteau Kerveguen (2ème caldera du Piton des Neiges) et son Rempart (Coteau Maigre).*

(.jpg)

A.1.10 LES CIRQUES

FIG. A.59 – *photo 59 :* ***Cirque de Cilaos - Ilet à Cordes*** *: au loin, le Piton des Neiges champ de lentilles entièrement manuel entre les pierres.*

(.jpg)

FIG. A.60 – *photo 60 :* ***Cirque de Salazie*** *: coulée boueuse de janvier 1980 (cyclone Hyacinthe) sur les flancs de Grand-Ilet. Elle a été favorisée par les pendages «aval» des matériaux. Il y a eu 10 morts.*

(.jpg)

FIG. A.61 – *photo 61 :* ***Cirque de Salazie****, près de Grand-Ilet : Travaux de RTM, réalisés par l'ONF. Essai de stabilisation des ravinements par construction de fascines et reboisement.*

(.jpg)

FIG. A.62 – *photo 62 :* ***Cirque de Cilaos : Pointe de l'îlet de Mare Sèche****. Ravinement intense dans les matériaux disloqués et les matériaux détritiques.*

(.jpg)

FIG. A.63 – *photo 63 :* ***Cirque de Mafate vu du Maïdo*** *: flets de La Plaine aux Sables, de Marla et de Kelval, étagés en gradins. Ravinement intense dans les matériaux disloqués, broyés et zéolitisés et dans les matériaux détritiques. Au fond, la crête du Taïbit, séparant les cirques de Mafate et Cilaos.*

(.jpg)

FIG. A.64 – *photo 64 : **Le Piton de La Fournaise** : à partir du premier plan : le Cratère Dolomieu, le Cratère Bory, l'Enclos Fouqué (dernière caldéra), le Rempart de Bellecombe, la Plaine des Sables (2ème caldéra), le Rempart des Sables. Au loin, le Massif du Piton des Neiges.*

(.jpg)

A.1.11 LE VOLCANISME ACTUEL

FIG. A.65 – *photo 65 :* ***Est de l'île : les Grandes Pentes*** *(au loin) et le Grand Brûlé (au premier plan) du Massif de La Fournaise. A gauche, rempart du Tremblet limitant au sud la caldéra. En noir : coulées de moins de 10 ans ; au loin en blanc (lichens) coulées de 10 à 30 ans ; au premier plan en vert (fourrés d'arbustes pionniers, de fougères et d'espèces secondaires) : coulées de plus de 30 ans.*

(.jpg)

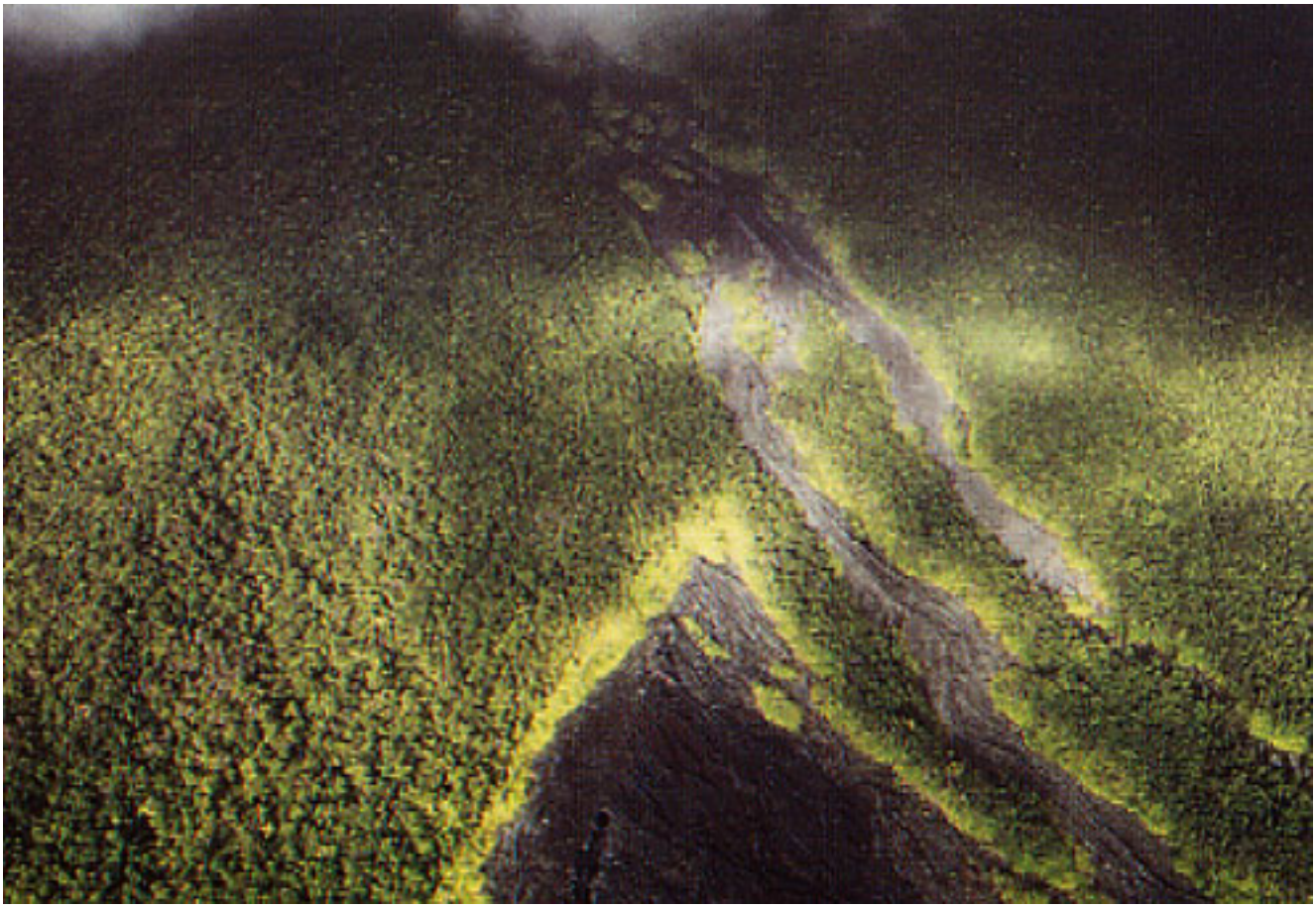
FIG. A.66 – *photo 66 :* ***Piton de La Fournaise*** *: l'éruption de 1988 dans l'Enclos Fouqué.*

(.jpg)

FIG. A.67 – *photo 67 :* ***Grandes Pentes de La Fournaise*** *: coulées de moins de 30 ans couvertes d'un épais manchon de lichens (Stereocaulon vulcani).*

(.jpg)

FIG. A.68 – *photo 68 : **Est de l'île** : coulées de 1977, hors Enclos, vers Piton Ste-Rose ; sorties effusives sans cônes de projections, à travers la forêt hygrophile de «bois de couleur».*



(.jpg)

FIG. A.69 – *photo 69 :* ***Est de l'île, Région de Piton Ste-Rose*** *: coulée de 1977 de type «aa», ayant atteint la mer.*

(.jpg)

A.2 Bibliographie sur la Réunion (1991)

A.2.1 Géologie

ALBAREDE F., TAMAGNAN V. - 1990 - Geochemical constraints on the magmatic processes at the Piton de la Fournaise (1931-1986). In : ”Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion”, île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

AMBROSETTI F. - 1984 - Les zéolites et minéraux hydrothermaux du sud de l’île de la Réunion (rivière Langevin et des Remparts) : contexte géologique, minéralogie. Thèse de spécialité. Univ. Toulouse.

AUBERT de LA RÜE E. - 1931 - Une excursion géologique à la Réunion et à l’île Maurice. Rev. Géogr. phys. Géot. dyn., vol. 4, n° 3, 1931, p. 201-221.

AUBERT de LA RÜE E. - 1965 - Le Piton de la Fournaise, volcan actif de l’île de la Réunion. Bull. Volc., 28, p. 311-320.

AUGE T. et al. - 1990 - Minéralogie des roches du complexe intrusif du Grand Brûlé. In : ”Le volcanisme de la Réunion - Monographie” lère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques Clermont-Ferrand. p.201 - 212.

BACHELERY P. - 1981 - Le Piton de la Fournaise (île de la Réunion). Etude volcanologique, structurale et pétrologique. Thèse Sème cycle, Univ. ClermondFerrand, 1981, 262 p..

BACHELERY P. - 1984 - L’éruption de décembre 1983 - février 1984 du Piton de la Fournaise. Bull. Labo. Géogr. Phys. Université de la Réunion, p. 2-14.BACHELERY P. - 1988 - Carte géologique de la ravine Saint-Gilles (échelle 1/5 000) et notice. BCEOM-Université de la Réunion-DAF, 1988, 12 p.

BACHELERY P., CHEVALLIER L. - 1981 - Evolution structurale du volcan actif du Piton de la Fournaise, île de la Réunion, Océan Indien Occidental. Bull. Volcanol., vol. 44-4, p. 723-741.

BACHELERY P., CHEVALLIER L. - 1982 - Carte volcano-tectonique du Massif de la Fournaise. île de la Réunion, notice explicative et carte à l’échelle du 1/50 000. Université Pierre et Marie Curie, Institut National d’Astronomie et de Géophysique, 1982, 28 p.

BACHELERY P., CHEVALLIER L. - 1982 - Carte volcano-tectonique du Massif de la Fournaise. île de la Réunion, notice explicative et carte à l’échelle du 1/50 000. Université Pierre et Marie Curie, Institut National d’Astronomie et de Géophysique, 1982, 28 p.

BACHELERY P., LALANNE F.X., VINCENT P.M., CHEVALLIER L. - 1981 L’éruption du mois de février 1981 au Piton de la Fournaise (île de la Réunion, océan Indien). Phénoménologie et remarques structurales. C.R. Ac. Sci. Paris, t. 293, p. 187-190, 1981.

BACHELERY P., BOIVIN P., KORNPROBST J. - 1982 - Essai sur la pétrologie des laves du Piton de la Fournaise (île de la Réunion, océan Indien) : cause de cristallisation et niveaux de fractionnement : arguments géochimiques, minéralogiques et expérimentaux. Sème réunion annuelle des Sciences de la Terre, Paris, p. 339, 1982.

BACHELERY P., MONTAGGIONI L. - 1983 - Morphostructure du flanc oriental du volcan de la Fournaise (océan Indien). C.R. Acad. Sci., série II, 1983, p. 81-84.

BACHELERY P., CHEVALLIER L., GRATTER J.P. - 1983 - Caractères structuraux des éruptions historiques du Piton de la Fournaise (île de la Réunion). C.R. Ac. Sci. Paris, t. 296, p. 1345-1350, 1983.

BACHELERY P., COUDRAY J., VINCENT P.M. - 1984 - La formation pyroclastique des ”Cendres de Bellecombe”, témoin d’un paroxysme phréato-magmatique récent au Volcan Piton de la Fournaise (Réunion). 10ème Réunion annuelle des Sciences de la Terre, Bordeaux, 1984, p. 24.

BACHELERY P., COUDRAY J., MONTAGGIONI L., PHILIPPOT F. - 1984 Nouveau levé bathymétrique au large de la Réunion. Essai d'interprétation concernant la zone est de la Fournaise. 10ème réunion annuelle des Sciences de la Terre, Bordeaux 1984, p. 152.

BACHELERY P., MAIRINE P. - 1990 - Evolution volcano-structurale du Piton de la Fournaise depuis 0,53 M.a. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" aère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 213-242.

BACHELERY P., LENAT J.F., DELORME H., TOUTAIN J.P., CHEMINEE J.L. 1990 - 1930 to 1990 eruptive activity at Piton de la Fournaise volcano : structural insights on the magma storage and feeding systems. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

BENDERITTER Y. - 1990 - Etudes géoélectriques et électromagnétiques à la Réunion. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" l ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques -ClermontFerrand. p. 29-42.

BILLARD G. - 1975 - Reconnaissance géologique des berges de la rivière des Remparts à Saint-Joseph. Rapport BRGM, 75 REU-1, fév. 1975 (inédit).

BILLARD G. - 1975 - Carte géologique de la Réunion et notice (en collaboration avec P.M. VINCENT). 1 ère édition, 40 pages, 4 feuilles à l'échelle du 1/50.000.

BLUM P.A., GAULON R., LALANNE F.X., RUEGG J.C. - 1981 - Sur l'évidence de précurseurs de l'éruption du volcan Piton de la Fournaise à la Réunionh. C.R. Acad. Sci.. Paris, 292 D : 1449-1455.

BORY DE SAINT-VINCENT J.B. - 1804 - Voyage dans les quatre principales îles des mers d'Afrique. Paris, an XIII (1804), 3 volumes.

BORY DE SAINT-VINCENT J.B. - 1820 - Sur une éruption du volcan de l'île des Mascareignes qui eut lieu en 1812. Ann. Gén. Sc. phys., Bruxelles, t. 3, 1820, p.145 - 159.

80UGERE J. - 1986 - L'activité volcanique à la Réunion au mois de mars 1986. Bull. labo géogr. phys., Université de la Réunion, 1986, 1 p. 3-22.

BRGM - 1966 - Etude géologique d'une retenue collinaire sur le Petit Bras de Pontho. Génie Rural et Service des Mines. Rapport TAN 66 A-11.

BRGM - 1981 - Etudes géologiques et géotechniques du site de retenue collinaire du Petit Bras de Pontho. Plton Rouge (site n° 8 de l'inventaire d'aménagement hydraulique des hauts). Région et DDA. Rapport REU 81-16.

BRGM - 1982 - Site n° 15 de retenue collinaire de Trois-Bassins. Reconnaissances géologiques et identifications géotechniques sommaires. Région et DDA. Rapport REU 82-31.

BRGM - 1982 - Retenue collinaire de Piton-Rouge (Commune du Tampon). Campagne complémentaire de reconnaissance. Direction des travaux. Région et DDA. Rapport REU 82-26.

BRGM - 1982 - Site de retenue collinaire dite du "Bras Sec". Reconnaissances géologiques et identifications géotechniques sommaires. (site n° 245). Région et DDA. Rapport REU 82-23.

BRGM - 1983 - Commune de Saint-Leu. Site de retenue collinaire n° 24 Nord des Hauts de la Chaloupe Saint-Leu. Reconnaissances géologiques et identifications géotechniques sommaires. Région et DDA. Rapport REU 83-07.

BUSSIERE P. - 1958 - Etude géologique de file de la Réunion. TBG n° 84 du service géologique de Tananarive, 1958, 64 pages + annexes + carte 1 /100.000.

CADET T. - 1978 - Données récentes sur l'origine, l'âge et la structure géologique de l'île de la Réunion. Bull. Acad. Réunion, 24 : 73-87.

CHEVALLIER L. - 1979 - Structures et évolution du volcan Piton des Neiges (île de la Réunion). Leurs relations avec les structures du Bassin des Mascareignes. océan Indien Occidental. Thèse Sème cycle, Université scientifique et médicale de Grenoble, 187 p.

CHEVALLIER L. - 1990 - Modèle de comportement mécanique et de structure interne du Piton de la Fournaise. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" lère éd, nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 297-306.

CHEVALLIER L., VATIN PERIGNON N. - 1979 - Les épisodes volcaniques liés aux différentes phases tectoniques du massif du Piton des Neiges - île de la Réunion, océan Indien. 7ème réunion ann. Sc. Terre, Lyon, 23-25, avril 1979.

CLOCCHIATTI R., NAVETTE A., NATIVEL P. - 1979 - Relations pétrogénétiques entre les basaltes et les océanites du Piton de la Fournaise (Réunion) à partir de la composition chimique des inclusions vitreuses des olivines et des spinelles. Bull. Minerai., 102 :511-525.

COUDRAY J., PHILIPPOT F. -) 1984 - La sédimentation volcanogénique récente autour de file de la Réunion. 10ème réunion annuelle des Sciences de la Terre, Bordeaux, 1984, p. 445.

DELORME H., BLUM P.A., BRIOLE P., RUEGG J.C. - 1990 - Clinometric and geodesic survey at Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island) : evidences for magma migration. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

DÉMANGE J. - 1986 - Bilan de l'exploration géothermique de file de la Réunion ; réinterprétation des données, au vu des résultats des forages SR 1 et SLZ 1 (GrandBrGlé - Salazie). Rapport de synthèse.

DENIEL C. - 1990 - Le magmatisme du Piton des Neiges. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" 1 ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 115-144.

DENIEL C., CONDOMINES M. - 1990 - U-Th-Ra radioactive disequilibria and Sr isotopes in Reunion volcanoes. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

DEVEY C.W., STEPHENS W.E., STOFFERS P. - 1990 - Deccan feeder dykes in the Seychelles and their implications for the spatial and temporal extent of Deccan magmatism. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

DRASCHE (R. Von) - 1878 - Die Insel Reunion (Bourbon) in Indischen Ocean. Eine geologische petrographische studie mit einem anhange überdie Insel Mauritius. Wien, in 4, 1878, 85 pages + planches + cartes.

DUBOIS J., CHEMINEE J.L. - 1990 - Les équences éruptives du Piton de la Fournaise sont-elles liées à un processus de chaos déterministe ? Recherche de l'attracteur du système. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

DUCROT M. - 1958 - Le volcan de la Réunion (période 1952-1957). Travaux du Bur. Géol., n° 88, Tananarive, 101 p.

DUCROT M. - 1959 - Le volcan actif de file de la Réunion. Surveillance et étude de l'activité. Possibilités d'utilisation de l'énergie émise. Bull. volc. série II, 23, p. 109120.

DUFFIELD W.A., STIELTJES L., VARET J. - 1982 - Huge landslide blocks in the growth of Piton de la Fournaise (La Réunion) and Kilauea volcano (Hawâi). Journ. Volcano. Geoth. Res., 12, p. 147-160.

DUNCAN R.A. - 1990 - The volcanic record of the Réunion hotspot. In : "Colloque sur le volcanisme intra-

plaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 1217 novembre 1990.

DUPONT P. - 1987 - Guide du volcan actif de la Réunion. Le Piton de la Fournaise. "Découverte et randonnée. CDDV-ONF, Conseil Général, 1987, 108 p.

GILLOT P.Y., NATIVEL P. - 1982 - K.Ar chronology of the ultimate acfivity of Piton des Neiges volcano, Reunion Island, Indian Ocean. Journ. Volcano. Geoth. Res., 13, p. 131-146.

GILLOT P.Y., NATIVEL P. - 1989 - Eruptive history of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island, Indian Ocean. J. Volcanol. Geotherm. Res., 36 : 53-65.

GILLOT P. et al. - 1990 - Géochronologie du Piton de la Fournaise. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" 1 ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 243256.

GRAHAM D., LUPTON J., ALBAREDE F., CONDOMINES M. - 1990 - A 360,000 year helium isotope record from Piton de la Fournaise, Reunion Island. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 1217 novembre 1990.

HAVETTE A., NATIVEL P. - 1977 - Apport de l'analyse ionique à l'étude minéralogique d'une ignimbrite à chimisme de benmoreite du Cirque de Salazie (île de la Réunion). Bull. Soc. Fr. Min. Crist., 100, p. 20-27.

HIRN A., LEPINE J.C., SAPIN M., NERCESSIAN A. - 1990 - Seismic monitoring of Piton de la Fournaise : instruments and results. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990. HUGOULIN J. - 1860 - Dernière éruption du volcan de l'île de la Réunion. Eruption du 19 mars 1860. Revue Algérienne et Coloniale. Tome 1, p. 483-487.

JACKSON D.B., LENAT J.F., TALIBART A., BACHELERY P. - 1983 - Piton de la Fournaise, ile de la Réunion and Kilauea volcano : are they analogs ? Abstr. AGU Meeting, Déc. 1983, EOS, 64 (45) : 905.

JEAN M. - 1935 - Les éruptions de 1913-1934 à la Réunion. Annal. Phys. du Globe de la France d'Outer-Mer, I, 1935, p. 147-154.

KIEFFER G. - 1979 - Aperçu sur la volcanologie de l'île de la Réunion. Bull. Soc. Géol. Fr. (7)à, ïXXI, n° 4, p. 419-425.

KIEFFER G. - 1988 - Une coulée pyroclastique basaltique dans la série II du Massif du Piton des Neiges (île de la Réunion). R.S.T., Lille, 1988, p. 80.

KIEFFER G. - 1990 - Evolution dynamique et structurale récente du Piton des Neiges. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" lère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques -ClermontFerrand. p. 163-186.

KIEFFER G. - 1990 - Grands traits morphologiques de l'île de la Réunion. In : "Le volcanisme de la Réunion -Monographie" lère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 75-114 KIEFFER G. - 1990 - Styles éruptifs particuliers dans les séries alcalines du Massif du Piton des Neiges (La Réunion). R.S.T., Grenoble, 1990, 1 page.

KIEFFER G., VINCENT P.M. - 1977 - Carte provisoire des risques volcaniques hors de l'Enclos au Piton de la Fournaise. C.R. de la mission scientifique d'intervention de l'INAG lors de l'éruption d'avril 1977 du Documents INAG.

KIEFFER G., VINCENT P.M. - 1978 - L'éruption d'octobre-novembre 1977 du Piton de la Fournaise (île de la Réunion) : une éruption terminale sans cratère terminal ? C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D, 286 : 1717-1770.

KIEFFER G., TRICOT B., VINCENT P.M. - 1977 - Une éruption inhabituelle (avril 1977) du Piton de la Fournaise (île de la Réunion). Ses enseignements volcanologiques et structuraux. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 285, p. 957-960.

KOPP A. - 1932 - L'éruption du Volcan de la Réunion en 1931. La géographie, janvier 1932.

KORNPROBST J., BOIVIN P., BACHELERY P. - 1979 - L'alimentation des éruptions récentes du Piton de la Fournaise (île de la Réunion, océan Indien) : degré d'évolution et niveau de ségrégation des laves émises. C.R. Acad. Sc!., Paris, 288 D, 29 : 1691-1694.

LACROIX A. - 1912 - Le volcan de la Réunion. C.R.A.S., Paris, 22 janvier 1912, t. 154, p. 169-174.

LACROIX A. - 1912 - Sur la constitution minéralogique de l'île de la Réunion. C.R.A.S., Paris, 16 septembre 1912, t. 155, p. 538-544.

LACROIX A. - 1936 - Le volcan actif de l'île de la Réunion et ses produits. GauthiersVillars Edit., Paris, 1936, 297 pages, 68 pl., 1 carte.

LAFFORGUE T. - 1986 - Etude sur l'écoulement des laves : mécanismes et simulations. Rapport BRGM 86 REU 12, octobre 1986, 82 pages + annexes.

LECOINTRE J. - 1983 - Aanalyse de l'évolution minéralogique verticale du sondage S 21 (chantier EDF, Barrage amont Takamaka).

LECOINTRE J., VINCENT P.M. - 1984 - Séquences de pyroclastites différenciées sur le massif du Piton des Neiges, île de la Réunion. Caractéristiques et signification volcano-structurale. Colloque P.LR.P.S.E.V., C.N.R.S., INAG, Clermond-Ferrand, 17-19 déc. 1984, p. 12.

LEGLEYE P - 1980 - Apport à l'étude géologique des Hauts de Saint Gilles, CAPBG, CNDP, la Réunion, 130 p.

LEGLEYE P. - 1981 - Analyse géologique d'un paysage côtier (entre Le Cap de La Marianne et Le Cap Champagne). CNDP-CDDP, n° 3, Tome II, décembre 1981, p.75-100.

LENAT J.F. - 1987 - Structure et dynamique interne d'un volcan de la Fournaise (île de la Réunion). Thèse, Univ. Clermond-Ferrand II.

LENAT J.F. - 1988 - Patterns of volcanic activity of Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean). A synthesis based on monitoring data between 1980 and july 1985 and an historic records since 1930. Proceedings in volcanology, vol 1, Contr. 19, p. 312-338. Springer-Verlag, Berlin-New York.

LENAT J.F., AUBERT M. - 1982 - Structure of Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island, Indian Ocean) from magnetic investigations. An illustration of the analysis of magnetic data in a volcanic area. J. Volcanol. Geotherm. Res., 12 : 361392.

LENAT J.F., BACHELERY P. - 1988 - Dynamics of magma transfers at Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island, Indian Ocean). In : Chi-yu and R. Scarpa (Editors) "modeling of volcanic processes". Friedr. Vieweg and Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, p. 57-72.

LENAT J.F., BACHELERY P. - 1990 - Structure et fonctionnement de la zone centrale du Piton de la Fournaise. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" 1 ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 257-296.

LENAT J.F., LABAZUY P. - 1990 - Morphologies et structures sous-marines de la Réunion. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" l ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - ClermontFerrand. p. 43-74.

LENAT J.F., VINCENT P., BACHELERY P. - 1989 - The off-shore continuation of an active basaltic volcano : Piton de la Fournaise (Reunion Island, Indian Ocean) structural and geomorphological interpretation from sea-beam mapping. J. Volcanol. Geothern. Res., 36 : 1-36.

LENAT J.F., BACHELERY p., BONNEVILLE A., HIRN A. - 1989 - The beginning of the 1985-1987 eruptive

cycle at Piton de la Fournaise (La Réunion) ; new insights in the magmatic and volcano-tectonic systems. J. of Volcan. and Geoth. Res., 36, 1989 : 209-232.

LENAT J.F., BACHELERY P., BONNEVILLE A., TARITS P., CHEMINEE J.L., DELORME H. - 1989 - The december 4, 1983 to february 18, 1984 eruption of Piton de la Fournaise (La Réunion, Indian Ocean) : description and int8rpretation. J. Volcanol. Geotherm. Res., 36 (1989), 87-112.

LEREBOUR P. - 1987 - Etude du forage du Grand-Brûlé (Piton de la Fournaise, île de la Réunion) : lithostratigraphie, pétrologie, minéralogies primaires et secondaires, Paris sud, Orsay.

LESQUER A. - 1990 - Structure profonde de l'île de la Réunion d'après les anomalies gravimètriques. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" lère éd, nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 19-28.

LIENHARDT G., MONTAGGIONI L., KIEFFER G. - 1979 - Compte rendu de l'excursion de la société géologique de France dans l'océan Indien (4-12 juillet 1978). Bull. Soc. Géol. France, 1979, t. XIX, n° 4, p. 415-418.

LOUGNON A. - 1962 - Voyage à file de la Réunion, de Bory de Saint-Vincent. Ed. Larose, Paris, 290 pages, 29 planches.

LUDDEN J.N. - 1976 - The petrology of Piton de la Fournaise Volcano, Reunion Island, Western Indian Ocean. Ph. D. Thèse Univ. de Manchester, 220 p.

LUDDEN J.N. - 1977 - Eruptive patterns for the volcano Piton de la Fournaise, Reunion ISland. J. Volcanol. Geotherm. Res., 2,4, 385-395.

LUDDEN J.N. - 1978 - Magmatic evolution of the basaltic shield volcanoes of Reunion Island. J. Volcanol. Gectherm. Res., 4, 1-2, 171-178.

McDOUGALL I. - 1971 - The geochronology and evolution of the younger volcanic Island of Reunion (Indian Ocean). Geochem. Cosmochim. Acta., vol. 36, n° 3, p.261 288.

McDOUGALL J.D., PANDE K., MURALI A.V. - 1990 - Alkali volcanism in Kutch, W. India : early manifestation of the Reunion Hotspot ? In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

MAILLARD M.L. - 1853 - Notes sur file de la Réunion. Bull. Soc. Géol. Fr., 2ème série, tome 10, p. 499-505.

MAIRINE P. - 1981 - Des coulées de vallées à la Réunion. CNDP-CDDP, SaintDenis, n° 3, tome II, décembre 1981, p. 117-137.

MAIRINE P. - 1981 - Quelques points d'étude sur la falaise de la route du Littoral. CDDP, Saint-Denis, 3, 33-50.

MAIRINE P. - 1984 - Les émergences du sud de file de la Réunion : hydrochimie, contexte lithologique et structural. Université de Saint-Denis.

MEYNIER V., MARTY B., NICOLINI E., GRIESSHABER E. - 1990 - Gas geochemistry of natural fluids, Reunion Island. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", ile de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

MONTAGGIONI L. - 1978 - Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'Archipel des Mascareignes (océan Indien Occidental). Thèse doctorat d'Etat. Université Aix-Marseille, 2 volumes.

MONTAGGIONI L. - 1979 - Observations préliminaires sur la topographie sousmarine du volcan de la Fournaise (île de la Réunion) : Interprétations morphostructurales. Travaux RCP 419, Mascareignes et Comores.

MONTAGGIONI L. - 1982 - Une paragénèse inhabituelle à fassâite, mélilite et rhônite dans un basalte alcalin

contaminé au contact d'un récif corallien (Saint-Leu, île de la Réunion). Bull. Minéral., 1982, 105, p. 364-375.

MONTAGGIONI L., NATIVEL P. - 1988 - La Réunion, île Maurice: géogie et aperçus biologiques. Masson - Guides géologiques régionaux, 192 p.

NATIVEL P. - 1976 - Trachytes quartzifères et comendites à la Réunion. Aspects pétrologiques. Bull. Soc. Géol. Fr., (7), XVIII, n° 5, p. 1357-1364.

NATIVEL P. - 1978 - Volcan de la Réunion - Pétrologie - faciès zéolite (Piton des Neiges), sublimés (Piton de la Fournaise). Thèse d'Etat - Paris sud (Orsay), 510 p.

NATIVEL P. - 1981 - Regard sur la pétrographie et sur le volcanisme du Piton des Neiges, du Cap La Houssaye à La Pointe de l'Entre-Deux. CNDP-CDDP, SaintDenis, n° 3, tome II, décembre 1981, p. 143-165.

NATIVEL P., JORON J.L., TREUIL M. - 1979 - Etude pétrographique et géochimique des volcans de la Réunion. Bull. Soc. Géol. Fr. (7), tome XXI, n° 4, p. 427-440.

OBSERVATOIRE VOLCANOLOGIQUE DE LA REUNION - 1982 - Evaluation et zonage des risques volcaniques. la Fournaise. ile de la Réunion.

PHILIPPOT F. - 1984 - La sédimentation volcanogène récente autour de file de la Réunion. Thèse de spécialité, Univ. Paris Sud-Orsay, 213 p.

RANCON J.P. - 1982 - Contribution à l'étude des minéralisation hydrothermales liées à un système géothermique récent dans file de la Réunion. Thèse Sème cycle, Paris-Sud (Orsay), 225 pages + annexes.

RANCON J.P. - 1990 - Lithostratigraphie du forage du Grand Brûlé. In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie" 1 ère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 187200.

RANCON J.P., LEREBOUR P., AUGE T. - 1987 - Mise en évidence par forage d'une chambre magmatique ancienne à l'aplomb de la zone orientale du Piton de la Fournaise (île de la Réunion). Implications volcanologiques. C.R. Acad. Sc!. Papis, série 11, 304 (1) : 55-60.

RIVALS P. - 1950 - (réédition 1990) - Histoire géologique de file de la Réunion. Azalées Editions, Saint-Denis, 400 p.

ROBERT D. - 1980 - Inventaire et analyse systématique des différents ensembles d'intrusions volcaniques (dykes et sills) de l'île de la Réunion ; répartition, nature, extension et chronologie relative. BRGM, Orléans, rapports 80 SGN 532 GTH et 80 REU 17.

ROCHER P. - 1985 - Caractérisation d'une séquence ignimbritique dans le massif du Piton des Neiges, île de la Réunion. Principaux résultats scientifiques et techniques. BRGM, RS2078, p. 176-177.

ROCHER P. - 1988 - Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du Piton des Neiges. Etude détaillée du Cirque de Salazie. Thèse Doctorat, Orsay, Paris-Sud. 443 pages + 1 carte.

ROCHER P. - 1990 - Evolution volcano-structurale du massif du Piton. In : "Le volcanisme de la Réunion -Monographie" lève éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 145162.

ROUSSET D., LESOUER A., BONNEVILLE A., LENAT J.F. - 1989 - Complote gravity study of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island. J. Volcanol. Geotherm. Res., 36 :37-52.

SCHLICH R., DYMENT J., MUNSCHY M. - 1990 - Structure and age of the Mascarene and Madagascar basins. In : "Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion", île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

STAUDACHER T., SARDA P., ALLEGRE C.J. - 1990 - Noble gas systematics on Reunion Island, Indian

Ocean. In : ”Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion”, île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

STIELTJES L. - 1986 - Coulées historiques du Piton de la Fournaise (île de la Réunion, océan Indien). Notice explicative, 43 pages et carte échelle 1/25.000, BRGM, Orléans, 1986.

STIELTJES L. - 1990 - Evaluation des risques naturels au Pironf de la Fournaise. In ”Le volcanisme de la Réunion - Monographie” lère éd. nov. 1990, J.F. LENAT Ed., publié par la Centre de Recherches Volcanologiques - Clermont-Ferrand. p. 357-? STIELTJES L. - 1990 - Infernal geological structures and evolution of an oceanic intraplate shield volcano : Piton des Neiges (Reunion Island, Western Indian Ocean). In : ”Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion”, île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

STIELTJES L., RANCON J.P., ROBERT D. - 1979 - Evaluation du potentiel géothermique de file de la Réunion. 2ème phase exploratoire : annexes géologiques. Rapport BRGM 79 SGN 538 GTH.

TOUTAIN J.P., MEYER G., ROCCHIA R., PERSON A. - 1990 - Evidence of gaseous iridium release at Piton de la Fournaise. In : ”Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion”, île de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

TRICOT B. - 1978 - Volcanisme à la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison SREPEN, Saint-Denis, n° 16, 1978, p. 85-95.

UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. - 1965 - Géology of Reunion Island, Indian Ocean. Nature, London, vol 207, p. 151-154.

UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. - 1966 - The basalts of Reunion Island, Indian Ocean. Bull. Vole, 29, p. 7-24.

UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. - 1970 - Infra-volcanic intrusions of Reunion. Geol. J., Spec. Issue, 2 : 141-156.

UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. - 1972 - Aspects of magmatic evolution on Reunion Island. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A 271, p. 105-130.

VELAIN C. - 1875 - Sur la constitution géologique du massif volcanique de l’île de la Réunion. C.R. Acad. Sci. 180, p. 497 et 900.

VELAIN J. - 1878 - Description géologique de la presqu’île d’Aden, de file de la Réunion, des files Saint-Paul et Amsterdam. Thèse Sciences, Paris, 1878.

VINCENT P., KIEFFER G. - 1978 - Hypothèse sur la structure et l’évolution du Piton de la Fournaise (file de la Réunion) après les éruptions de 1977. 6ème réunion annu. Sci. Terre, Orsay, (Soc. Geol. Paris, France): 407.

VINCENT P.M., LECOINTRE J. - 1984 - Volcanisme explosif sur un volcan Hawàien: le cas du Piton des Neiges, file de la Réunion. 10ème Réun. Ann. Sci. Terre, Bordeaux, p. 549.

ZLOTNICKI J., LE MOUEL J.L. - 1990 - Eruptive dynamism and volcanomagnetic variations on Plton de la Fournaise volcano. In : ”Colloque sur le volcanisme intraplaque. Le point chaud de la Réunion”, file de la Réunion, 12-17 novembre 1990.

Géomorphologie ANTOINE P., GIRAUD A., HAURIE J.L., PINCHENOT H. - 1988 - Geological history of Piton des Neiges volcano (Reunion Island) and its effects on slope stability. Bull. Ass. Intern. de la Géologie de l’Ingénieur, juillet 1988.

AVEROUS P. - 1983 - Esquisse géomorphologique des atterages de file de la Réunion. Document Terres Australes et Antartiques Françaises.

BACHELERY P., MONTAGGIONI J. - 1983 - Morphostructure du flanc oriental du volcan de la Fournaise, île

de la Réunion (océan Indien). C.R. Acad. Sci. Paris, 297 (série II) : 81-84.

BANTON O., COUDRAY J. - 1984 - Apports de la géomorphologie à la connaissance de la structure et de la génèse d'un complexe alluvio-lacustre en pays volcanique : le Grand-Etang (La Réunion). Bull. Labo. Géogr. phys. Université de la Réunion, 1984, n° 3-4, p. 13-16.

BATTISTINI R. - 1966 - Le volcan actif de la Réunion. Madagascar, Revue de géographie, n° 9, 1966, p. 16-44.

BOUGERE J. - 1983 - Notes sur les aspects de l'érosion dans le cirque de Mafate. Coll. ONF, 6 p.

BOUGERE J. - 1984 - Premiers résultats d'érosion et de ruissellement sur parcelles à la Réunion. XXVè Cons. Int. Géogr., 12 p.

BOUGERE J. - 1987 - Atouts et contraintes du milieu naturel réunionnais. Bull. Assoc. Géogr., Paris, 1987, 5 p. 407-413.

BOUGERE J. - 1989 - Erosion et sédimentation dans les cirques du massif du Piton des Neiges : Cilaos, Mafate, Salazie (île de la Réunion, océan Indien). Université de la Réunion. Laboratoire de géographie physique, 25 p, 1989.

CADET T. -1965 - Glissement de terrain dans la vallée du Bras de Mahavel survenu le 6 mai 1965. Rapport Préfecture de la Réunion, 24 mai, 6 p (inédit).

CALICHIAMA C., GRUCHET J. - 1983 - Inventaire des mouvements de terrain à la Réunion, depuis 1718, d'après les recherches d'archives. Rapport BRGM 83 REU 20, 9 p + annexes.

CHEVALLIER L. - 1979 - Structures et évolution du volcan Piton des Neiges (île de la Réunion). Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes. océan Indien Occidental. Thèse Sème cycle, Grenoble, 187 p + cartes.

CHEVALLIER L., BACHELERY P. - 1981 - Evolution structurale du volcan actif du Piton de la Fournaise, île de la Réunion, océan Indien Occidental. Bull. Volcano., 44, (4) : 723-741.

CHEVALLIER L., VATIN-PERIGNON N. - 1982 - Volcano-structural evolution of Piton des Neiges. Réunion Island -Indian Ocean. Bull. Volcanol., vol. 45-4, p. 285298.

DEFOS DU RAU J. - 1956 - Un Cirque des Hauts de la Réunion : Cilaos. Les Cahiers d'Outre-Mer, juillet-sept. 1956, p. 263-313.

DEFOS DU RAU J. - 1959 - Note sur la morphologie volcanique à la Réunion. Mém. IRSM, Madagascar, série D, tome IX, 1959, p. 23-34.

DEFOS DU RAU J. - 1960 - Le relief de l'île de la Réunion. Thèse, annexes, Bordeaux, 462 p.

DERRUAU M. - 1970 - Problèmes de morphologie volcanique à file de la Réunion. M.R.G., 17, 7-35.

DERRUAU M., KARCHE J.P., MOTTET G. - 1970 - Problèmes de morphologie volcanique à file de la Réunion. Revue de géographie, n° 17, p. 7-35, juilletdécembre, 1970. Université de Madagascar, Faculté des lettres, Laboratoire de géographie.

DUFFIELD W.A., STIELTJES L., VARET J. - 1982 - Huge landslide blocks in the growth of Piton de la Fournaise, la Réunion, and Kilauea volcano, Hawaï. J. Volcanol. Geotherm. Res., 12 : 147-160.

GOGUEL J. - 1984 - Le rôle des éboulements dans la morphologie de l'île de la Réunion. Sér. Documents du BRGM, n° 83, colloque Caen 22-24 mars 1984, mouvements de terrain.

HAURIE J.L. - 1987 - Géodynamique des Cirques de la Réunion. Implications géotechniques et stabilité des versants. Thèse, Univ. scientifique, technologique et médicale de Grenoble, 1987, 284 p.

HAURIE J.L. - 1990 - Contraintes et aléas naturels à la Réunion. C.LS.G., 4 cartes 1/100 000 + notice explicative.

HUMBERT M. - 1984 - Les risques d'inondation sur le plateau des Etang à Cilaos (île de la Réunion). Rapport BRGM, 84 REU 09, 44 p + annexes (inédit.) HUMBERT M. - 1986 - Erosion, drainage des eaux superficielles et inondations torrentielles à La Plaine des Makes (île de la Réunion). Rapport BRGM, 86 REU, 019 GEG, mai 1986, 13 p.

HUMBERT M. - 1986 - Erosion, drainage des eaux superficielles et inondations torrentielles à La Plaine des Palmistes (île de la Réunion). BRGM Document 86 REU 017 GEG, mai 1986, 32 p.

HUMBERT M., PASOUET R., STIELTJES L. - 1981 - Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos (île de la Réunion). Rapport BRGM, 81 SGN 543 REU, 101 p, 2 cartes 1 /25.000.

HUMBERT M., ALLIEZ V., STIELTJES L. - 1985 et 1986 - Les systèmes érosifs des grandes ravines "au vent" de file de la Réunion ; leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des Hauts. Rapports BRGM 85 SGN 121 GEG et 86 SGN 132 GEG.

HUMBERT M., ALLIEZ V., STIELTJES L. - 1986 - Les systèmes érosifs des grandes ravines "au vent" à file de la Réunion ; leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des Hauts. Volume II. Rapports BRGM 86 SGN 132 GEG.

HUMBERT M., STIELTJES L. - 1986 - L'érosion dans le cirque de Mafate. île de la Réunion. Ses conséquences sur le maintien de l'économie des Ilets. Rapport BRGM 86 REU 173 GEG.

HUYEZ A., JANAUD A.M. - 1984 - Géomorphologie littorale Bull. labo. géogr. phys. Université de la Réunion, 1984, n° 1, p. 15-24.

JEAN M. - 1936 - Sur l'action torrentielle à la Réunion. Bull. Acad. Réunion, p. 3-12, 1936-1937.

KIEFFER G. - 1989 - La formation des Cirques du massif du Piton des Neiges (La Réunion). Bull. Assoc. Géogr. Fr., Paris, 1989, 5, p. 361-370.

LÉNAT J.F., VINCENT P., BACHELERY P. - 1989 - The off-shore continuation of an active basaltic volcano : Piton de la Fournaise (Reunion Island, Indian Ocean) ; structural and geomorphological interpretation from sea beau mapping. J. of Volc. and Geoth. Research, 36 (1989).

LUSTREMANT D. - 1981 - L'éboulement d'extension catastropnique de GrandSabla, cirque de Salazie. Etude bibliographique. Rapport BRGM 81 REU 05.

MONTAGGIONI L. - 1978 - Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'Archipel des Mascareignes (océan Indien Occidental). Thèse, Aix-Marseille.

PINCHINOT H. - 1984 - Etude géologique des formations superficielles et du proche substratum à Grand Ilet (Cirque de Salazie) : application à la cartographie du risque de mouvements de terrains. Thèse Sème cycle, Grenoble, IRIGM, 215 p + cartes.

POMEL R.S. - 1986 - Morphologie volcanique et paléoclimatologie des Iles Canaries. Comparaison avec d'autres milieux volcaniques insulaires (île de la mer Tyrrhénienne et de la Mer Egée, île de la Réunion). Thèse Aix en Provence, 3 t., 817.p.

POUL X. - 1965 - L'éboulement du rempart au lieu-dit "Le Bras de Mahavei". Rapport BRGM TAN 65 R/24.

POUL X - 1965 - Eboulement de masse dans file de la Réunion : Etude particulière de l'éboulement du rempart au lieu-dit "Le Bras de Mahavel". Rapport BRGM, TAN/A/24, 15 juin 1965 (inédit).

ROBERT R. - 1980 - Géographie physique de file de la Réunion. Ed. Cazal, StDenis, 78 p.

ROBERT R. - 1974 - Morphologie littorale de l'île de la Réunion. Thèse Sème cycle de Montpellier, CTCUR,

Nlle Imp. Dyonisienne, 183 p.

ROBERT R. - 1980 - A la découverte de la Réunion. Approche géographique. Editions Favory, St-Denis, 115 p.

ROBERT R. - 1986 - Climat et hydrologie à la Réunion. Etude typologique, étude régionale de l'alimentation et de l'écoulement. Thèse d'Etat, Université de Montpellier, 438 p.

STIELTJES L. - 1979 - Brèches et effondrements des cirques. Rapport BRGM 79 SGN 535 GTH, annexe III.

STIELTJES L. - 1981 - Aspects techniques et socio-économiques des conséquences de l'érosion accélérée des terrains volcaniques de file de la Réunion (océan Indien). Séminaire de gestion régionale des sédiments. Propriano, 27-29 mai 1981.

STIELTJES L. - 1983 - Sensibilité à l'érosion et aux risques de mouvements de terrains géologiques dans le bassin versant de la Rivière du Mât. Rapport BRGM 83 REU 17.

STIELTJES L. - 1984 - Sensibilité à l'érosion et aux mouvements de terrains dans le cirque de Mafate (Bassin versant de la Rivière des Galets). Rapport BRGM 84 REU 04.

STIELTJES L., ROBERT D. - 1981 - Analyse structurale de file de la Réunion. Implications morphologiques, géologiques et géothermiques. Synthèse sur l'évaluation du potentiel géothermique de file de la Réunion. Rapport BRGM (inédit.).

TROADEC R. - 1984 - La dynamique sédimentaire des baies de La Possession et de Saint-Paul, île de la Réunion. Thèse de spécialité, Université Aix-Marseil, 1984.

VINSON Dr. - 1876 - Note sur une commotion souterraine au centre de file de la Réunion. Désastre, disparition d'un hameau de 62 personnes. C.R. Acad. Sci., Paris, série D, t. 82, 1876, p. 149-152.

VON DRASCHE R. - 1878 - Die Insel Reunion in Indischen Ocean, Holder, Vienne, 85 p.

A.2.2 Pédologie

ANGE A. - 1974 - Plaine des Palmistes, étude morphopédologique. Rapport IRAT, 65 p. + cartes à l'échelle du 1/25 000.

ANGE A., BURDIN S., FORTIER M. - 1977 - Fragmentation d'un sol ferrallitique à caractères andiques par les ultrasons et l'eau oxygénée. Agron. Trop., 32, 4 : 352359.

BENDA P. - 1957 - L'érosion des sols à la Réunion. Bull. Ac. de la Réunion, n° 19.

BERTRAND R. - 1972 - Compte-rendu provisoire de mission pédologique à la Réunion. Rapport IRAT, 32 p., 1972.

BERTRAND R. - 1972 - Environnement et morphologie d'un andosol à horizon d'accumulation induré. C.R. Acad. Sc. Paris, 1972, T 275, pp. 1343-1346.

BOUGERE J. - 1988 - Aperçu sur l'érodibilité des andosols cultivés à la Réunion. In "Les andosols de Ille de la Réunion - Séminaire de St Denis", CIRAD, 24 mai-1 er juin 1988, pp. 157-162.

BOURON B. - 1990 - Caractérisation hydrique des sols d'une toposéquence. Mémoire DAA, ENSA, Montpellier, IRAT, 57 p. + annexes.

BROUWERS M. - 1982 - Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de Saint Paul. Aptitudes à la canne. IRAT-DDA, 1982, 49 p. + annexes + carte à l'échelle du 1/25 000.

BROUWERS M. - 1982 - Inventaire morpho-pédologique dans les "Hauts" de la Réunion. Aptitudes agricoles

des Terres. Deuxième phase. Rapport IRAT-DDA, 1982, 23 p. + annexes + cartes à l'échelle du 1 /25 000.

BROUWERS M. - 1984 - Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de La Saline à Saint Leu. Aptitudes des sols à la culture sous irrigation. IRAT-DDA, 1984, 27 p., carte à l'échelle du 1/25 000.

BROUWERS M., RAUNET M. - 1981 - Inventaire morphopédologique dans les "Hauts" de la Réunion. Aptitudes agricoles des terres. IRAT-DAA, 1981, 90 p. + annexes + cartes à l'échelle du 1 /25 000.

BROUWERS M., FORTIER M. - 1989 - Recherche d'un test pour le suivi de l'agrégation des sols andiques réunionnais. Rapport IRAT-ENSAM-CEEMAT, Montpellier, mars 1989, 17 p.

BROUWERS M., FORTIER M. - 1988 - Quelques propriétés rhéologiques des andosols de la Réunion en liaison avec leur utilisation agricole. In : "Les andosols de file de la Réunion - Préparation d'un programme de recherches interdisciplinaires". Séminaire de Saint Denis, 24 mai-ter juin 1988, p. 141-153.

BROUWERS M., CASTA P., FORTIER M. - 1985 - Limites de traficabilité et sensibilité au compactage de trois matériaux de sols cultivés en canne à sucre à la Réunion. Rapport IRAT, 15 p., nov. 1985.

CHABALIER P.F. - 1985 - Effet du séchage du sol sur les déterminations chimiques réalisées sur les sols à caractères andiques. Fiche n° 13, IRAT-Réunion.

CHABALIER P.F. - 1990 - Fertilité des sols de la Réunion (période 1986-1989). Mise en évidence de la variabilité spatiale par région, par type de sol : pH, phosphore, azote, potasse. IRAT-CIRAD.

CHECKOURI I. - 1990 - Appréciation du pouvoir minéralisateur des sols réunionnais par différentes méthodes chimiques et biologiques. Rapport de stage, IRAT, août 1990, 41 p. + annexes.

CHEVIN P. - 1983 - Sols bruns des Hauts de la Réunion. Approche empirique de leur comportement en laboratoire et sur les chantiers. DDE, Exposé du 24 juin 1983, la Réunion, 20 p.

CHEVIN P. - 198? - Construction de routes sur les andosols à la Réunion. DDE, CEBTP/LDER, la Réunion.

CLARIOND A., DENAIX L., DOREE J.F., GAUDY F., PERRET S., PY F. - 1989 Les andosols de file de la Réunion -Caractérisation et comportement agronomique - Bilan d'une année de recherche pluridisciplinaire. CORDET 1988, Doc. CIRAD, octobre 1989, 11 p.

CLARIOND A., PERRET S. - 1990 - Impact du feu sur les caractéristiques physicochimiques d'un andosol. Cas du brulage d'un andain issu d'un défrichement. Note technique CEEMAT/CIRAD - Laboratoire de physique des sols, mai 1990, 7 p.

COUTINET S. - 1977 - Contribution à l'étude des sols à allophanes. Agron. Trop., 22 1157-1175.

DENAIX L. - 1989 - Etude des constituants et de la micro-organisation d'andosols de la Réunion. DEA de Pédologie - Université Paris VI, INRA-Versailles, février–septembre 1989, 48 p. + annexes.

DEVANNE E. - 1990 - Etude pédoclimatique du périmètre irrigué du Bras de Cilaos (île de la Réunion). Application à l'irrigation de la canne à sucre. Mémoire ESATIRAT Janvier 1990, 22 p. + annexes.

DE VILLELE A. - 1896 - Nécessité de l'analyse du sol. La Revue Agricole, mai 1886, p. 265-271, Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1897 - Les sols de la Réunion. lère partie. La Revue Agricole, mars 1887, Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1898 - Les sols de la Réunion. 2ème partie. La Revue Agricole, mars 1898, Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1899 - L'étude des sols. La revue agricole, avril, juin, juillet 1899. environ 18 p., Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1900 - Les sols de la Réunion - 3ème partie. La Revue Agricole, mai 1900, Sème partie, p. 183-200, Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1901 - La chaux dans les sols acides. La Revue Agricole, février 1901, p. 87-95, Saint Denis.

DE VILLELE A. - 1904 - Quelques observations sur les sols de la Réunion. La Revue Agricole, mai et juin 1904, Saint Denis.

DIDIER de SAINT-AMAND R. - 1965 - Aménagement hydro-agricole du Bras de La Plaine. Etudes pédologiques. IRAT-SEDAGRI, juin 1965. 73 p. + annexes + cartes à l'échelle du 1/10 000.

DIDIER de SAINT-AMAND R. - 1966 - Contribution à l'étude pédologique de la bande côtière s'étendant de l'Etang-Salé à La Pointe de Bretagne. Rapport IRAT, 10 p., novembre 1966.

BIBLIOGRAPHIE 371 DIDIER de SAINT-AMAND R. - 1966 - Les sols des cônes de déjection de la Rivière du Mât, Champ-Borne et Bras-Panon. Rapport IRAT, 106 p. + carte à l'échelle du 1/10 OOO,septembre 1966.

DIDIER de SAINT-AMAND R. - 1966 - Les sols de la Plaine des Galets. Rapport IRAT, 74 p. + cartes à l'échelle du 1/20 000.

FORTIER M., BROUWERS M. - 1987 - Caractéristiques physiques de quatre sols réunionnais. Résultats et synthèse des mesures exécutées au laboratoire. Rapport IRAT-Montpellier, novembre 1987, 30 p.

FRITZ J. - 1967 - Recherche des carences minérales des sols de la Réunion en vases de végétation. Coll. Fert. Sols. Trop. Tananarive (Madagascar), p. 381-385.

FRITZ J. - 1973 - Dynamique de l'azote dans le sol en deux situations de la Réunion. Rapport IRAT-Réunion, n° 81, nov. 1973.

FROSSARD E. - 1983 - Amélioration du statut phosphorique d'un sol réunionnais par apports de matière organique. DAA-ENSA/Nancy, 1983, 57 p.

FROSSARD E. - 1985 - Etude expérimentale de l'influence de composés organiques sur l'évolution des ions phosphate en sols "ferrallitiques". La Réunion. Thèse Doctorat INPL-ENSA, Nancy, 109 p.

GALBAN J.F. - 1973 - La rétention de l'eau dans les sols de quelques stations de Ille de la Réunion. Rapport IRAT, Réunion, 22 p.

GAUDY F. - 1990 - Comportement hydrodynamique et évolution de l'état structural des horizons de surface sous pluie simulée. Cas d'un andosol cultivé de file de la Réunion. Mémoire CNEARC/CEEMAT/IRAT, février 1990, 62 p. + annexes.

GENSE C. - 1973 - Conditions de formation de l'imogolite dans les produits d'altération de roches volcaniques basiques de l'île de la Réunion. Bull. Groupe Français des argiles, XXV, 1 : 79-83.

GENSE C. - 1976 - L'altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Madagascar et à la Réunion. Thèse Sc. Université Louis Pasteur Strasbourg, 176 p.

GODEFROY J. - 1980 - Etude pédologique des stations IRFA de la Réunion. Rapport IRFA, 97 p.

GRANDEAU L. - 1896 - Analyse du sol et du sous-sol d'une caféière. La Revue Agricole, février 1896, Saint Denis.

GUENNELON R. - 1953 - La mise en valeur des terres nouvelles à la Réunion. Informations agricoles n° 10.

GUENNELON R. - 1953 et 1954 - Les phénomènes d'érosion et leur importance à Ille de la Réunion. Informations agricoles n° 12 et 13, octobre 1953 et janvier 1954.

GUENNELON R. - 1955 - Conservation des sols et lutte contre l'érosion à l'île de la Réunion. Annal. Agron., Paris, n° 3, mai-juin 1955, p. 423-497.

HAILE A. - 1980 - Les modifications de la capacité d'échange cationique (CEC) effective de quelques sols

tropicaux, par l'application du phosphore. DEA-ENSAUSTL Montpellier, IRAT, 52 p.

HAILE A. - 1982 - Etude de l'effet d'amendements minéraux sur la réduction des pertes minérales par lixiviation dans quelques sols dominés par des colloïdes à charges variables (la Réunion et autres pays), IRAT, Montpellier.

IMBERNON J. - 1982 - Caractérisation hydrodynamique de deux sols de la Réunion. Rapport de mission IRAT, 1982, 30 p.

JOUVE S. - 1984 - Caractéristiques hydriques et hydro-dynamiques de 2 types de sols. Andosols et sols bruns à caractères andiques. La Réunion. Document IRAT, septembre 1984, 110 p.

LOYNET G. - 1975 - Relations entre les propriétés hydriques, la matière organique et les substances amorphes dans des sols sur matériaux basaltiques en climat tropical humide. Mémoire de stage (ENSAM-IRAT), 16 p.

MAYER P. - 1987 - Etude de l'évolution des caractéristiques hydriques et chimiques des sols sous Cryptomerias. Conseil Régional-GREF, 81 p.

MICHELLON R. - 1988 - Systèmes de culture dans les sols andiques. In : "Les andosols de file de la Réunion. Préparation d'un programme de recherches interdisciplinaires". Séminaire de Saint Denis, 24 mai-1 er juin 1988, p. 95-111.

NGO CHAN BANG, FRITZ J. - 1968 - Etude des propriétés physiques de quelques sols de la Réunion. Rapport annuel IRAT-REUNION, 1973, p. 31-45.

PENSEC A. - 1987 -Influence du séchage sur les caractéristiques physicochimiques des sols à caractères andiques à la Réunion. Doc. IRAT, Réunion, juilletnov. 1987, 125 p.

PERRET S. - 1988 - Travail du sol sous cultures vivrières. effets du labour sur l'état du profil cultural. "Contrat de Plan recherche agronomique : cultures vivrières et maraichères" CIRAD, Journées d'information du 7 avril 1988, 14 p.

PERRET S. - 1989 - Caractérisation physique et mécanique des sols andiques de file de la Réunion. Présentation des premiers résultats analytiques 1989, (préparation d'une thèse). Rapport CEEMAT, 13 p. + annexes.

PICHOT J. - 1981 - Influence de la finesse du calcaire sur la correction du pH d'un sol des Hauts de l'Ouest. Fiche d'essai n° 34, IRAT REUNION, 8 p.

PICHOT J., BILLAUD J.C., PHILOTE A. - 1982 - Influence de la finesse du calcaire corallien sur la correction de l'acidité d'un sol ferrallitique de la région nord. Fiche d'essai n° 20, IRAT REUNION, 13 p.

PICHOT J. - 1984 - Caractérisation physico-chimique des sols de quelques essais variétaux régionaux du CERF. Action concertée CERF-IRAT sur la nutrition de la canne à sucre. Fiche d'essai n° 2, IRAT REUNION, 8 p. + annexes 14 p.

PY F., CLARIOND A. - 1989 - Influence de l'érosion et des techniques culturales sur les caractéristiques des andosols de la Réunion. Etude des relations entre stock organique, stabilité structurale et activité microbienne. DAA-ENSAT, IRAT, septembre 1989, 103 p. + annexes.

POOL X. - 1966 - Mise en valeur hydro-agricole de la zone d'Etang-Salé. etude hydrogéologique. Chapitre Etude pédologique et besoins en eau de l'agriculture. Esquisse pédologique (échelle 1/10.000).

Rapport BRGM TAN 66-A/22, juin 1966, p. 2-13.

Rapport BRGM TAN66-A/32, décembre 1966, p. 3-17.

RAUNET M. - 1985 - Périmètres de Saint-Gilles et de Saint-Leu. Morpho-pédologie et aptitudes à la mise en valeur. IRAT-DDA, 1985, 62 p. + annexes. 2 cartes à l'échelle du 1/5 000 + 1 carte à l'échelle du 1/25 000.

RAUNET M. - 1989 - Cartes morphopédologiques à l'échelle du 1/10.000 sur le littoral ouest, de La Rivière des Galets à La Ravine du Cap. Aptitudes à l'irrigation. IRAT/CIRAD/Conseil Générai - 5 coupures.

BIBLIOGRAPHIE 373 RAUNET M. - 1990 - Les grandes catégories de sols de file de la Réunion. Notice de la carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000. CIRAD: région Réunion, 17 p.

RAUNET M. - 1991 - Cartes morpho-pédologiques à l'échelle du 1/10 000 sur les périmètres du Bras de La Plaine Bras de Cilaos. Aptitudes à l'irrigation. IRAT/CIRAD/Consiel Général - 5 coupures, à paraître en 1991.

RIOUIER J. - 1958 - Etude hydro-agricole de la région de Saint-Pierre - Saint-Louis. Les sols de la région de Saint-Pierre - Etang-Salé. BCEOM, 21 p. + annexe + carte 1 /40 000.

RIQUIER J. - 1960 - Les phytolithes de certains sols tropicaux et des podzols. 7th Inter. Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin, USA, 1960, p. 425-430.

RIQUIER J. - 1960 - Carte pédologique de file de la Réunion à l'échelle du 1/100 000 et notice. Raport ORSTOM-IRSM, Tananarive, 72 p.

RIQUIER J., ZEBROWSKI C. - 1975 - Atlas de la Réunion : pédologie, CEGET et IGN - 1975.

ROSELLON V. - 1984 - Les sols bruns des Hauts, île de la Réunion. Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement. Thèse de spécialité, Université Paris VII.

TRUONG B., BERTRAND R., BURDIN S., PICHOT J. - 1974 - Contribution à l'étude du phosphore dans les sols dérivés de roches volcaniques de l'île de la Réunion (Mascareignes). Action du carbonate et du silicate de calcium. Agron. Trop., vol. XXIX, 1974, n° 6-7, p. 663-674.

VAKSMANN M. - 1987 - Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de file de la Réunion. Thèse, Montpellier (ENSAM-USTL), 170 p.

VAKSMANN M. - 1988 - Elaboration d'un modèle de simulation du bilan hydrique sur sol andique. Rapport IRAT, Saint-Denis, mars 1988, 18 p.

WEYLAND M. - 1990 - Etude expérimentale de l'espace poral et des comportements hydriques et hydrdynamiques d'andosols cultivés de l'île de la Réunion. Mémoire DAA, ENSAT (Toulouse) - CIRAD, septembre 1990, 82 p. + annexes.

ZEBROWSKI C. - 1975 - Etude d'une climatoséquence dans file de la Réunion. Cah. ORSTOM, série Pédol, vol. XIII, n°3/4, 1975 : 255-278.

A.2.3 Hydrologie - Hydrogéologie

BANTON O. - 1985 - Etude hydrogéologique d'un complexe alluvial en pays volcanique sous climat tropical. Site du Grand-Etang, île de la Réunion. Thèse Sème cycle USTL, Montpellier,237 p.

BARGEAS A. - 1981 - Programmes de calcul de paramètres hydrologiques pour la calculatrice T 159. Déficit d'écoulements annuels - hydrogrammes crues (S.C.S.) Evapotranspiration réelle. Rapport BRGM 81 REU 24, 40 p.

BARGEAS A. - 1983 - Le bassin versant expérimental de Dos d'Ane. Exploitation des données recueillies en 1981 et 1982. Rapport BRGM 83 REU 19.

BARGEAS A. - 1984 - Apports de la simulation par modèles hydrologiques. Applications à l'évaluation globale de la ressource en eau de file de la Réunion. Thèse de spécialité, Université de Bordeaux III, 384 p., 91 fig., 6 annexes.

BARGEAS A. - 1984 - Approche du bilan hydrologique de file de la Réunion. Mise en place sur micral de fichiers de données et de programmes de traitement. BRGM, SGN/EAU - Note technique n° 84/04, 27 p. + 1 fasc. annexe.

BARGEAS A., STEENHOUDT M. - 1982 - Le bassin versant expérimental du Dos d'Ane : mise en place des équipements. Rapport BRGM 82 REU 22.

B.C.E.O.M. - 1985 - Etude de faisabilité pour l'irrigation du littoral ouest. Département. Etat.

B.C.E.O.M. - REUNION - 1986 - Programme Départemental d'étude des ressources en eau. Littoral sud-ouest Saint-Joseph-Petite-île. Département et DDA.

BOCOUEE F. - 1985 - Annuaires hydrométriques (1976 à 1985). REDETAR, Section hydrologie, Département Réunion.

BOCOUEE F. - 1986 - Aménagement hydro-agricole de l'ouest de la Réunion. Synthèse des Ressources en eau superficielle. Département et DDA, REDETAR, Section hydrologie.

BRGM - 1964 - Aménagement hydroagricole de la Rivière du Mât. Rapport géologique Génie Rural. Rapport TAN 64 A/35.

BRGM - 1964 - Etude hydro-agricole de la zone littorale comprise entre la Possession et le secteur de Saint-Philippe. Génie Rural. Rapport TAN 64 A/36.

BRGM 1965 - Rapport hydrogéologique sur l'alimentation en eau de la ville de SaintLeu. Génie Rural. rapport TAN 65 A/29 (compl. rapport TAN 64A/36).

BRGM - 1966 - Alimentation en eau du casier expérimental du Champ-Borne. Génie Rural et Service des Mines. Rapport TAN 66 A/12.

BRGM - 1966 - Etudes hydrogéologiques ponctuelles dans le secteur de la Possession à Saint-Paul. Ponts et Chaussées. Génie Rural et Service des Mines. Rapport TAN 66 A/3i BRGM - 1966 - Les sources thermo-minérales de Cilaos. Etude géologique et étude des principales caractéristiques. Débit, température et résistivité des captages existants. Service des Mines. Rapport TAN 65 A/27.

BRGM - 1967 - Etude des ressources de file de la Réunion en "eau de table" et en "eau minérale". Préfecture et Ministère de l'Agriculture. Rapport TAN 67 A/35.

BRGM - 1968 - Etude hydrogéologique de la zone nord de file comprise entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât. DDA. Rapport TAN 68-28.

BRGM - 1968 - Sources thermominérales de Cilaos. Travaux de reconnaissance par puits et galeries en vue de leur recaptage. Service des Mines. Rapport TAN 68-9.

BRGM - 1968 - Alimentation en eau de l'agglomération de La Possession. Approfondissement du puits de la Ravine à Marquet. DDA. Rapport TAN 68-15.

BRGM - 1968 - Alimentation en eau du casier expérimental de Champ-Borne. Ouvrages de captage effectués en 1967. DDA. Rapport TAN 68-23.

BRGM - 1968 - Sources thermominérales de Cilaos. Travaux de reconnaissance. Service des Mines. Rapport TAN 68-30.

BRGM - 1969 - Sources thermominérales de Cilaos. Travaux d'aménagement du captage. Service des Mines. Rapport TAN 69-7.

BRGM - 1969 - Parc départemental d'Etang-Salé. Alimentation en eau, puits n° 1. O.N.F. Rapport TAN 69-7.

BRGM - 1969 - Alimentation en eau de la commune du Port. Travaux de reconnaissance hydrogéologique

effectués de janvier à avril 1969. DDE Rapport TAN 69-20.

BRGM - 1969 - Commune de La Possession. Puits de la Ravine à Marquet. Travaux de galerie. DDA et DDE. Rapport TAN 69-32.

BRGM - 1969 - Parc Départemental d'Etang-Salé. Alimentation en eau. Puits n° 2, ONF et Service des Mines. Rapport TAN 69-35.

BRGM - 1969 - Mise en valeur hydroagricole de la zone correspondant au lieu-dit "Les Sables" (sert. d'Etang-Salé). Ouvrages de captage creusés par le BRGM en août et septembre 1968. DDA. Rapport TAN 69-22.

BRGM - 1969 - Alimentation en eau de la ville du Port. Puits du stade municipal. Essai de pompage. DDE. Rapport TAN 69-30.

BRGM - 1969 - Aménagement hydroagricole du littoral occidental de la Réunion. Etude hydrogéologique de la zone comprise entre la Possession et la Pointe-auxAvirons, le rivage et la ligne de niveau 200. DDA, Rapport TAN 69-33.

BRGM - 1970 - Alimentation en eau de la commune du Port. Travaux de reconnaissance hydro-géologique effectués de mai à novembre 1969 (compléments aux rapports 69 TAN-20 et 69 TAN 32). DDE. Rapport TAN 70-13.

BRGM - 1970 - Captage de la Source Blanche. Reconnaissance géologique. DDE. Rapport TAN 70-18.

BRGM - 1970 - Commune de Saint-Paul. Etude géologique de l'environnement de la Source Sarrois. Société d'Etudes des eaux minérales. Rapport TAN 70-23.

BRGM - 1970 - Commune de Saint-Denis. Aménagement du puits du Chaudron. DDE et Service des Mines. Rapport TAN 70-30.

BRGM - 1971 - Carte géologique de la Réunion (4 feuilles au 1/50.000). Service des Mines. Rapport TAN 70-1, TAN 70-15, TAN 71-14, TAN 71-25.

BRGM - 1971 - Commune de La Possession. Etude géologique de la Source Denise. Particulier (Supertime). Rapport TAN 71-5.

BRGM - 1971 - Alimentation en eau de la commune du Port. Travaux de reconnaissance hydrogéologique. Campagne 1970. DDE et Service des Mines. Rapport TAN 71-07.

BRGM - 1972 - Ville de Saint-Denis. Aménagement du puits du Chaudron. DDE. Rapport TAN 72-6.

BRGM - 1972 - Alimentation en eau de Sainte-Marie. Etude géophysique par sondages électriques sur la Rivière des Pluies. DDA. Rapport TAN 72-13.

BRGM - 1972 - Reconnaissance hydrogéologique de la grande ravine des Lataniers. DDE. Rapport TAN 72-15.

BRGM - 1972 -Puits de l'aérodrome de Saint-Denis-Gillot. DDE. Rapport TAN 7218.

BRGM - 1972 - Grande Ravine des Lataniers. Source Dumesgnil. Sondage de reconnaissance géologique. DDE. Rapport TAN 72-21.

BFiGM - 1972 - Résultats des études hydrogéologiques et géophysiques sur la partie ouest de f ile de la Réunion en 1972. DDA. Rapport TAN 72-24.

BRGM - 1972 - Alimentation en eau des communes urbaines de la Réunion. Rapports hydrogéologiques. DDE. Rapport TAN 72-19.

BRGM - 1972 - Recherches d'anomalies thermiques au long de la côte ouest de file de la Réunion. DDE. Rapport SGN/GEO 72.

BRGM - 1972 - Aménagement hydroagricole du Bras de Cilaos. Etude géophysique par sondages électriques et sismiques réfractions sur le site de l'ouvrage de prise d'eau. DDA. Rapport TAN 72-17.

BRGM - 1973 - Etudes hydrogéologiques de la Plaine des Galets, sondages de reconnaissance préliminaire. DDE. Rapport TAN 73-2.

BRGM - 1973 - Pompages d'essais sur le puits de Gillot (Saint-Denis-île de la Réunion), septembre 1973. DDE. Rapport TAN 73-5.

BRGM - 1973 - Etude hydrogéologique et géophysique de la Plaine des Galets et de la rive gauche de la Rivière des Galets (île de la Réunion). DDE. Rapport 73-RIME 029 AF.

BRGM - 1973 - Etudes hydrogéologiques de la portion ouest de file de la Réunion. (1972). DDA. Rapport TAN 73-4.

BRGM - 1974 - Commune de Sainte-Rose. Puits de la Rivière de l'Est. Enquête géologique officielle. DDA. Rapport REU 74-1.

BRGM - 1974 - Commune de Sainte-Rose. Sources de l'Anse des Cascades. Enquête géologique officielle. DDA. Rapport REU 74-3.

BRGM - 1975 - Commune de La Possession. Reconnaissance hydrogéologique de la Petite Ravine des Lataniers. Société Foncière de la Réunion. Rapport REU 75-3.

BRGM - 1976 - Reconnaissance hydrogéologique des pentes dominant Saint-Denis. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 76-01.

BRGM - 1976 - Reconnaissance hydrogéologique de la Grande Anse. Commune de Petite-île. Rapport REU 76-03.

BRGM - 1976 - Puits de Pierrefonds. Pompages d'essai. FAZOI. Rapport REU 7604.

BRGM - 1976 - Analyse de thermographies de file de la Réunion pour recherches d'anomalies géothermiques. Préfecture Réunion. Rapport REU 76-07.

BRGM - 1977 - Etude hydrogéologique de la Plaine des Galets. Campagnes de forages 1975 et 1976. DDE. Rapport REU 77-01.

BRGM - 1977 - Puits de la centrale EDF du Port. Pompages d'essai. DDE. Rapport REU 78-03.

BRGM - 1977 - Etude hydrogéologique de la Plaine des Galets. Campagne de forages 1977. DDE. Rapport REU 78-03.

BRGM - 1978 - Etude hydrogéologique de la Plaine des Galets. Campagne de forages 1979. DDE. Rapport REU 79-01.

BRGM - 1978 - Eva!uation du potentiel géothermique de file de la Réunion première phase exploratoire. Géologie et géochimie des eaux. Rapport 78 SGN 467 GTH.

BRGM - 1979 - Eléments géologique et hydrogéologique pour l'aménagement des Hauts. Rapport 79 SGN 105 REU.

BRGM - 1979 - Etude géophysique de la Plaine des Galets. Réinterprétation des données. DDE. Rapport 79 GPH 47.

BRGM - 1980 - Périmètre de protection du puits de la zone d'entrepôt du Chaudron. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 80-EXOI.

BRGM - 1980 - Programme Départemental de recherches d'eau 1980 pour l'aménagement des Hauts de la

Réunion. flet de Cilaos. Département et DDA. rapport REU 80-16.

BRGM - 1980 - Etude sur modèle analogique des ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets (phase 2, construction du modèle) DDE. Rapport 80 SNG SGAL 006 72.

BRGM - 1980 - Etude sur modèle analogique des ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets (phase III, étalonnage du modèle) DDE. Rapport 80 SGN SGAL 0701.

BRGM - 1980 - Projet d'extension de la centrale EDF du Port. Synthèse hydrogéologique de la Plaine des Galets. EDF REAM. Rapport REU 80-20.

BRGM - 1980 - Etude sur modèle analogique des ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets. DDE. Rapport 80 SNG SGAL 00730 1).

BRGM - 1980 - Etude sur modèle analogique des ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets DDE. Rapport 80 SGN SGAL 00730 2).

BRGM - 1980 - Projet d'implantation d'une exploitation agricole à la Réunion. CCIR. Rapport 80 REU 05.

BRGM - 1980 - Mise en place de la banque des données du sous-sol et de l'hydrogéologie à file de la Réunion. BRGM Service Public. Rapport 80 SGN 339 BSS et 80 SGN 914 BSS.

BRGM - 1981 - Inventaire des sites de microcentrales hydroélectriques à la Réunion. Conseil Régional. Rapport 81 REU 2.

BRGM - 1981 - Etude hydrogéologique préalable à l'établissement d'un schéma directeur de renforcement de l'alimentation en eau potable de Saint-André. SEURECA. Rapport REU 81-09 BRGM - 1981 - Ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets. Modèle analogique DDE. Rapport REU 81-25.

BRGM - 1981 - Etude sur modèle analogique des ressources en eaux souterraines de la Réunion. Note complémentaire. DDE. Rapport SGAL 00730.

BRGM - 1981 - Résultats des pompages d'essais effectués sur le puits de Maison Rouge. Commune de Saint-Louis. Rapport REU 81-20.

BRGM - 1980-82 - Aménagement hydraulique des Hauts de la Réunion. Recherche de sites de retenues collinaires. Région et DDA (SEURECA). Secteurs de la Chaloupe Saint-Leu, La Plaine des Cafres. Rapport 80 REU01. Secteurs de SaintDenis, Saint-Joseph, La Possession. Rapport 82 REU 20. Secteurs de Saint-Paul Nord, de Saint-Paul Sud, Trois-Bassins, Saint-Joseph. Rapport REU 81-13.

BRGM - 1982 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines de la Plaine des Galets 1981. Commune du Port. Rapport REU 82-01.

BRGM - 1982 - Mise en place du réseau de piézométrie de la commune de SaintDenis. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 82-13.

BRGM - 1982 - Inventaire et collecte des données hydroclimatiques et appréciations de la pluie efficace sur l'ensemble de file de la Réunion. BRGM Service Public Eau. Rapport REU 82-02.

BRGM - 1983 -Impact du creusement du nouveau port sur les ressources en eaux souterraines de la Plaine des Galets. DDE. Rapport 83 SGAL 01.

BRGM - 1983 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines de La Plaine des Galets 1982. Commune du Port. Rapport REU 83-02.

BRGM - 1983 - Extension portuaire en baie de La Possession. Contrôle hydrogéologique de l'exhause en fouille sur le chantier portuaire. Bilan au 30 avril 1983. DDE. Rapport REU 83-05.

BRGM - 1983 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines sur le territoire communal de Saint-Denis.

Mai 1982, avril 1983. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 83-06.

BRGM - 1983 - Exploitation des eaux souterraines de la Plaine des Galets simulation sur modèle des prélèvements EDF. EDF Rapport 83 SGAL 118.

BRGM - 1983 - Programme départemental d'etude de ressources en eau 1981. Etang de Saint-Paul. Exploitation des eaux superficielles. Rapport d'exécution du programme de reconnaissance complémentaire et analyse des modalités de captage. Département et DDA. Rapport REU 83-09.

BRGM - 1983 - Impact des travaux du chantier d'extension portuaire en Baie de La Possession. DDE. Rapport 83 SGN SGAL 021.

BRGM - 1983 - Impact des travaux du chantier d'extension portuaire de la Baie de La Possession. GTMI. Rapport 83 SGN SGAL 226.

BRGM - 1984 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines de la Plaine des Galets. 1983. Commune du Port. Rapport REU 84-02.

BRGM - 1984 - Commune de Saint-Louis. Etang du Gol. Compte-rendu d'exécution d'un sondage de reconnaissance. Commune de Saint-Louis. Rapport REU 84-03.

BRGM - 1984 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines sur le territoire communal de Saint-Denis. Mai 1983, avril 1984. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 84-12.

BRGM - 1984 - Protection des ressources en eaux naturelles par barrage hydraulique face à l'impact d'un rabattement de nappe en fouille sur le chantier du nouveau port en baie de La Possession. DDE. Rapport REU 84-17.

BRGM - 1984 - Projet de centrale thermique au charbon à la Réunion. Etude bibliographique pour la recherche d'eau douce. Site du nouveau port (Baie de La Possession). Site de la plaine Chabrier (Baie de Saint-Paul). EDF-REAM. Rapport REU 84-18.

BRGM - 1984 - Etudes hydrogéologique et propositions en vue de l'établissement des périmètres de protection des ouvrages d'eau potable PII, Pllbis, F2 et F3. Commune du Port. Rapport REU 84-21.

BRGM - 1984 - Chantier du nouveau port en Baie de La Possession. Contrôle de l'impact des travaux sur les aquifères de La Plaine des Galets. DDE. Rapport REU 84-24.

BRGM - 1984 - Programme départemental d'étude des ressources en eau. Commune de La Possession. Renforcement de l'alimentation en eau potable. Essai de pompage du forage de Dos d'Ane des 26, 27 et 28 novembre 1984. Département et DDA. Rapport REU 84-29.

BRGM - 1984 - Surveillance piézométrique des nappes littorales de file de la Réunion. BRGM, Service Public, Eau. Rapport REU 84-05.

BRGM - 1984 - Consultation d'un fichier informatisé sur l'alimentation en eau de la Réunion. Cartographie automatisée des réseaux. BRGM, Service Public Eau. Rapport REU 84-20.

BRGM - 1984 - Ressources, besoins et gestion de l'eau à la Réunion. Bilan et perspectives. BRGM, Service Public Eau. Rapport REU 84-23.

BRGM - 1984 - Etude hydrochimique des émergences de l'île de la Réunion. Bilan au ter décembre 1984 et propositions pour 1985. BRGM Service Public Eau. Rapport REU 84-27.

BRGM - 1985 - Puits de la Ravine à Marquet. Recherche des facteurs de la baisse de productivité de l'ouvrage. Examen des remèdes. Commune du Port. Rapport REU 85-01.

BRGM - 1985 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines de la Plaine des Galets. 1984. Commune du Port. Rapport REU 85-02.

BRGM - 1985 - Recaptage de sources. Etude de faisabilité et prévention des risques géologiques. Centre hospitalier spécialisé de Saint-Paul. Rapport REU 85-06.

BRGM - 1985 - Modélisation des aquifères de la Plaine des Galets. Synthèse des données hydrogéologiques (note d'avancement des travaux). DDE et commune du Port. Rapport REU 85-07.

BRGM - 1985 - Programme département d'étude des ressources en eau 1982-83. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Compte-rendu des travaux des forages de reconnaissance (PIB, 3 4 et 5). Synthèse des données hydrogéologiques pour l'élaboration d'un modèle de simulation mathématique. Département et DDA. Rapport REU 85-08.

BRGM - 1985 - Commune de Saint-Paul. Zone d'aménagement de Saint-Gilles. Etude hydrogéologique. Niveaux de nappe phréatique. SEDRE. Rapport REU 85-10. BRGM - 1985 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines sur le territoire communal de Saint-Denis. Mai 1984, avril 1985. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 85-10.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude de ressources en eau. Synthèse des études hydrogéologique et géophysiques. Secteur du Tévelave. Département et DDA. Rapport REU 85-13.

BRGM - 1985 - Périmètres de protection des ouvrages de captage pour l'alimentation en eau potable. Puits Pli et Pli bis. Forages F2 et F3. Commune du Port. Rapport REU 85-14. (Complément au rapport REU 84-21).

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1984). Littoral ouest. Interprétation des résultats de prospection géophysique. Rapport préliminaire en vue de l'implantation de forage. Secteur nord de Saint-Leu (Pointe des Chateaux). Département et DDA. Rapport REU 85-15.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1984). Bassin témoin du Dos d'Ane. (Commune de La Possession). Analyse et synthèse des données recueillies en 1983 et 1984. Département et DDA. Rapport REU 85-18.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1984). Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage en rive droite de la rivière Saint-Etienne. Rapport d'implantation. Département et DDA. Rapport REU 85-20.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1984). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Interprétation des travaux de géophysique complémentaires Département et DDA. Rapport REU 85-23.

BRGM - 1985 - Modélisation des aquifères de la Plaine des Galets. Etalonnage du modèle. Simulation des prélèvements. DDE et commune du Port. Rapport REU 8524.

BRGM - 1985 - Commune du Tampon. Tunnel de la conduite du captage d'alimentation en eau potable des Hirondelles. Reconnaissance hydrogéotechnique. Commune du Tampon. Rapport REU 85-26.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1984). Littoral Ouest. Etude des ressources en eau. Conditions hydrogéologiques et bilan hydrologique. Synthèse des reconnaissances géophysiques. Département et DDA. Rapport REU 85-27.

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau. Etude géophysique par sondages électriques sur le littoral et les hauteurs de Saint-Leu. Département et DDA. Rapport 85DTC 15 GPH (Rapport REU 85-27 bis).

BRGM - 1985 - Programme départemental d'étude des ressources en eau. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Relevés piézométriques d'août 1982, avril 1985. Complément au rapport REU 85-08. Département et DDA. Rapport REU 85-31.

BRGM - 1985 - Sondages à la tarière mécanique. Etang de Saint-Paul. Compte rendu de travaux du 3 décembre 1985. IFREMER. Rapport REU 85-32.

BRGM - 1985 - Etude hydrochimique des émergences de l'île de la Réunion. Bilan au 1 er décembre 1985 et propositions pour 1986. Evaluation de la ressource renouvelable des nappes perchées. Suivi de la source Sarrois (Saint-Paul). BRGM Service Public Eau. Rapport REU 85-33.

BRGM - 1986 - Atlas hydrogéologique de la Réunion. Collectif 1986 - Rapport BRGM 86 REU 30, Département de la Réunion.

BRGM - 1986 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines de la Plaine des Galets 1985. Commune du Port. Rapport REU 86-01.

BRGM - 1986 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines à la centrale du Port 1985. EDF centre Réunion. Rapport REU 86-02.

BRGM - 1986 - Commune du Port. Forage d'irrigation du Parc des sports. Etude de faisabilité. Commune du Port. Rapport REU 86-04.

BRGM - 1986 - Programme départemental d'étude des ressources en eau 1985. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Essai de pompage du forage PIB 2. Département et DDA. Rapport REU 86-05.

BRGM - 1986 - Programme départemental d'études des ressources en eau 1985. Etude géophysique par sondages électriques sur le littoral et les hauteurs de SaintLeu. Département et DDA. Rapport REU 86-13.

BRGM - 1986 - Surveillance piézométrique des eaux souterraines sur le territoire communal de Saint-Denis. Commune de Saint-Denis. Rapport REU 86-24.

BRGM - 1986 - Programme départemental d'etude des ressources en eau 1985. Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage rive-droite de la Rivière Saint-Etienne. Département et DDA. Rapport REU 86-23.

BIBLIOGRAPHIE 381 BRGM - 1986 - Evaluation de la ressource renouvelable des nappes perchées dans les Hauts de l'Ouest. Source Sarrois. Département DDA, BRGM (Service Public Eau), Rapport REU 85-33 et REU 86-20.

BRGM - 1986 - Commune de Saint-Pierre. Etudes hydrogéologiques et propositions en vue de l'établissement des périmètres de protection des ouvrages de captage pour l'alimentation en eau potable. Forages de la Saiette. Rapport REU 86 EX 01. Commune de Saint-Pierre.

BRGM - 1986 - La Réunion. Sites pour centrale thermique. Reconnaissance hydrogéologique. Site de la Baie de la Possession. EDF/REAM. Rapport REU 86-26.

BRGM - 1986 - La Réunion. Sites pour centrale thermique. Reconnaissance hydrogéologique. Site de la Baie de Saint-Paul. EDF/REAM. Rapport REU 86-31.

BRGM - 1986 - Vulnérabilité des points d'eau servant à l'alimentation en eau potable des communes de la Réunion. BRGM Service Public Eau. Rapport REU 86-07.

CADET G. - 198? - Les eaux souterraines de l'Ouest de la Réunion hydrodynamique et hydrochimie. Université Réunion-Université d'Avignon. Projet de thèse d'Etat.

CGC - 1962 - Génie rural de la Réunion. Reconnaissance par prospection électrique. Zones de La Possession, des Colimaçons, de Saint-Leu ville, des Avirons, de l'Etang-Salé, de la Rivière des Galets, de la Rivière Saint-Etienne. 8 septembre, 15 novembre, 1962.

CHAUVEL L., DAESSLE M. - 1986 - Etude hydrochimique des émergences de file de la Réunion. Bilan début 1986 - Analyse des résultats. Rapport BRGM 86 REU 25. Département de la Réunion.

CHEMIN J., DUBREUIL G. - 1984 - Etude géophysique et hydrogéologique des Hauts de Saint Paul. Rapport BRGM 84 REU 06.

CLERC J.M., COUDRAY J., BURKHALTER R. - 1986 - Résultats préliminaires d'une reconnaissance des émergences d'eau douce en mer sur la côte ouest de l'île de la Réunion par thermographie infra-rouge aéroportée. 11ème réunion des Sciences de la Terre, Clermont-Ferrand, 37 p.

COUDRAY J. - 1990 - Approche hydrogéologique In : "Le volcanisme de la Réunion - Monographie". fière éd. nov. 1990. J.F. LENAT Ed., publiée par le Centre de Recherches Volcanologiques Clermont-Ferrand, pp. 307-356.

DAESSLE M. - 1984 - Bassin expérimental du Dos d'Ane. Mise en place d'un piézomètre. Essai de pompage de février 1984. rapport BRGM 84 REU 26.

DAESSLE M., JOIN J.L. - 1988 - Cliché de salinité des nappes souterraines de la côte ouest de file de la Réunion. Rapport BRGM, 88 REU 05, 18 p. + annexes.

DAESSLE M., JOIN J.L. - 1988 - Renforcement de l'alimentation en eau potable (AEP) de Saint Paul. Etude hydrogéologique pour l'implantation d'un ouvrage de captage des eaux souterraines (secteur Savannah-Cambaie). Rapport BRGM 88 REU 02, mai 1988, Saint Denis, 12 p.

DAF - 1988 - Irrigation Littoral ouest. Transfert Mafate-Salazie - Etude d'impact. SNABRL, SCP et SECMO, Saint Denis, Note de synthèse, 15 p.

DANLOUX J. - 1973 - La Rivière de l'Est - Campagne 1971-1972. ORSTOMTananarive, 1973, 18 p. + annexes.

DANLOUX J. - 1973 - La Rivière de l'Est. Contribution à l'étude des étiages. ORSTOM, Tananarive, 1973, 9 p. + annexes.

DDA - 1967 - Etude des ressources et des besoins en eau à la Réunion.

DDE - 1971 - Tableau des débits journaliers des principales rivières du Département - Saint Denis, la Réunion (1967-1971).

DDE - CEA - 1980 - Etude des ressources en eaux superficielles des Hauts de Saint-Denis. Commune de Sain-Denis.

DDE - CEA - 1980 - Etude du bassin versant de la Rivière du Butor. Commune de Saint-Denis.

DDE - CEA - 1981 - Etude des ressources en eaux superficielles des Hauts de La Possession. Commune du Port.

DDE - CEA - 1983-84-85 - Suivi hydrométrique de la Galerie du Bras Guillaume. Département - Commune de Saint-Denis.

DDE - LCHF - 1981 - Monographie de la Rivière Saint-Denis. Département.

DDE - LCHF - 1981 - Monographie de la Ravine du Chaudron. Département.

DDE - LCHF - 1981 - Monographie de la Rivière des Pluies. Département.

DDE - LCHF - 1981 - Monographie de la Rivière des Galets. Département.

DDE - LCHF - 1981 - Monographie de la Rivière du Mât. Département.

DDE - LCHF - 1981 - Etude hydrologique de la Rivière Saint-Denis. Commune de Saint-Denis.

DDE - LCHF - 1983 - Etude hydrologique de l'endiguement du Chaudron. Commune de Saint-Denis.

DDE - LCHF - 1983 - Etude hydrologique de la Ravine-Blanche. Commune de SaintDenis.

DDE - PERRIER V. - 1983 - Présentation du site et des problèmes de l'Etang du Gol.

DDE - MASSARI M. - 1983 - Diagnostic du réseau d'alimentation en eau potable de Saint-Pierre. Commune de Saint-Pierre.

DDE - ENILORAC M.P. - 1984 - Diagnostic du réseau d'alimentation en eau potable de Saint-Denis. Commune de Saint-Denis.

DDE - HOAREAU M. - 1985 - Diagnostic du réseau d'alimentation en eau potable du Port. Commune du Port.

DDE - SOGREAH - 1969 - Etude hydrologique de la Rivière Saint-Etienne. Commune de Saint-Louis.

DDE - SOGREAH - 1973 - Etude hydrologique de la Ravine du Butor. Commune de Saint-Denis.

DDE - SOGREAH - 1978 - Eiude hydrologique de la Rivière des Pluies. Commune de Sainte-Marie.

DDE - SOGREAH - 1967-82 - Etude hydrologique de la Ravine des Patates à Durand. Commune de Saint-Denis.

DDE - SOGREAH - 1982 - Etude hydrologique de la Rivière des Remparts. Commune de Saint-Joseph. DDE - SOGREAH - 1983 - Etude hydrologique de la Ravine du Chaudron. Commune de Saint-Denis. DDE - SOGREAH - 1984 - Monographie de la Rivière des Galets. Commune du Port.

DRIR - 1976 - Les sources thermominérales de Cilaos.

DRIR - 1978 - Exploitation à distance du point d'émergence de l'eau minérale de la source Irénée à Cilaos, après transport par canalisation.

DUBREUIL G. - 1980 - Etude géophysique par sondages électriques dans le Cirque de Cilaos. Rapport BRGM 80 SGN 753 GPH.

DUBREUIL G. - 1980 - Essai méthodologique en géophysique dans les Hauts de Saint-Gilles-Saint-Leu. Rapport BRGM 80 SGN 824 GPH.

DUBREUIL G. - 1981 - Etude géophysique par sondages électriques dans la Plaine des Grègues. Rapport BRGM 81 SGN 043 GPH.

DUBREUIL G. - 1981 - Etude hydrogéologique par sondages électriques dans la Plaine de l'Entre-Deux. Rapport BRGM 81 SGN 179 GPH.

DUBREUIL G. - 1983 - Etude géophysique par sondages électriques dans la Plaine des Cafres. Rapport BRGM 83 SGN 225 GPH.

DUBREUIL G. - 1984 - Etude géophysique par sondages électriques dans les Hauts de Saint-Gilles - Saint-Paul. Rapport BRGM 84 SGN 074 GPH.

DUBREUIL G. - 1984 - Etude géophysique par SE dans la Plaine du Bras de Cilaos. Rapport BRGM 84 SGN 307 GPH.

DUBREUIL G. - 1984 - Etude géophysique par SE au Tévelave. Rapport BRGM 84 SGN 324 PGH.

GOURGAND B., STIELTJES L. - 1988 - Hydrogéologie du volcan de la Fournaise (Île de la Réunion). Hydrogéologie, BRGM, 1988, n° 2, pp. 95-105.

GOURGAND B., STIELTJES L., DAESSLE M. - 1988 - ïle de la Réunion exploitation des eaux souterraines. Bilan des prélèvements effectués en 1985 par puits et forages. Hydrogéologie, BRGM, 1988, n° 2, pp. 117-123.

JOIN J.L., POMME J.B., COUDRAY J., DAESSLE M. - 1988 - Caractérisation des aquifères basaltiques en domaine littoral. Impact d'un récif corallien. Hydrogéologie, BRGM, 1988, n° 2, pp. 107-115.

LE GOURIERES D. - 1960 - Inventaire des eaux superficielles et souterraines pour la mise en valeur de la Plaine des Galets. ORSTOM-Paris (mission hydrologique de l ile de la Réunion).

LE GOURIERES J. - 1961 - Caractères généraux de l'hydrologie. Rivières de la région "sous le vent" - Rivières de la Région "au vent". ORSTOM, 1961.

LE GOURIERES D., TOUCHEBOEUF DE LUSIGNY P. - 1961 - Hydrologie souterraine de La réunion. Exposé des résultats obtenus par la mission hydrologique de l'ORSTOM (1959-1961).

LUSTREMANT D. - 1981 - Plaine des Cafres. Analyse et synthèse des données existantes. Rapport BRGM 81 REU 07.

LUSTREMANT D., STEENHOUDT M. - 1981 - Les Hauts de Saint-Gilles. Analyse et synthèse des données existantes. Rapport BRGM 81 REU 10.

LUSTREMANT D., STEENHOUDT M. - 1982 - Les Hauts de Saint-Paul. Analyse et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM 82 REU 08.

LUSTREMANT D., STEENHOUDT M. - 1982 - Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Analyse et synthèse des données. Rapport BRGM 82 REU 10.

NICOLINI E., MAIRINE P., JUSSERAND C., COUDRAY J., LETOLLE R. - 1986 Approche de l'hydrogéologie du Piton de la Fournaise (île de la Réunion) par études géochimiques et isotopiques. Premiers résultats. 11ème réunion des Sciences de la Terre, Clermond-Ferrand, 137 p.

ORSTOM - 1960 - Ressources en eau de la région de Cilaos. île de la Réunion.

ORSTOM - 1960 - Bilan hydrologique de la Ravine Saint-Gilles. île de la Réunion.

ORSTOM - 1960 - Alimentation en eau potable de la Plaine des Cafres. Commune du Tampon. île de la Réunion.

ORSTOM - 1960 - Recensement des bassins de la Plaine des Cafres. Commune du Tampon. île de la Réunion.

POOL X. - 1966 - Mise en valeur hydro-agricole de la zone d'Etang-Salé. Etude hydrogéologique. Rapport BRGM, Tananarive, TAN 66 A/32, décembre 1966, 94 p. + annexes + cartes.

POUL X. - 1966 - Etude hydrogéologique de la zone littorale comprise entre La ravine du Cap et La Pointe des Avirons. Rapport BRGM, Tananarive, TAN 66 A122. juin 1966, 76 p. + annexes.

POOL X. - 1968 - Aménagement hydro-agricole de la zone d'Etang Salé. Puits de la zone domaniale et de la Ravine Sèche. Rapport BRGM, Tananarive, 68 TAN 17, avril 1968, 19 p. + annexes.

POUL X. - 1969 - Etude hydrogéologique de la Plaine du Gol. Rapport BRGM, Tananarive, 69 TAN 23, juin 1969, 38 p. + annexes.

POOL X. - 1969 - Etude hydrogéologique de la Plaine de Saint-Paul. Rapport BRGM, Tananarive, 69 TAN 26.

REDETAR - Section hydrologie - 1979 - Aménagement hydroagricole du Bras de Cilaos. Etude hydrologique complémentaire. Département.

REDETAR - Section hydrologie - 1979 - Etude des ressources en eau du secteur ouest de Salazie. Station hydrométrique des Fleurs-Jaunes. Commune de Salazie.

REDETAR - Section hydrologie - 1980 - Esquisse hydrométéorofogique des effets du cyclone Hyacinthe sur le département. DDA.

REDETAR - Section hydrologie - 1980 - Fichier des points d'eau à la Réunion. Département.

REDETAR - Section hydrologie - 1981 - Etude hydrologique pour l'aménagement des Hauts de file. Région.

REDETAR - Section hydrologie - 1981 - Programme départemental 1980 d'études des ressources en eau. Rapport de synthèse (secteurs Cilaos, Entre-Deux, Plaine des Grègues), Département et DDA.

REDETAR - Section hydrologie - 1982 - Aménagement Takamaka aval. Etude hydrologie. EDF/REAM.

REDETAR - Section hydrologie - 1982 - L'étiage de La Ravine Saint-Gilles.

REDETAR - Section hydrologie - 1982 - L'Etang de Saint-Paul. Hydrologie des basses eaux. Années 1981/82. Département.

REDETAR - Section hydrologie - 1982 - Application d'un modèle de régression à la distribution statistique du ruissellement sur un bassin versant type des Hauts de l'Ouest. Département.

REDETAR - Section hydrologie - 1984 - Aménagement de Takamaka aval. Etudes hydrométriques complémentaires. EDF/REAM.

REDETAR - Section hydrologie - 1984 - La crue du 16 avril 1984 sur la Rivière Sainte-Suzanne. DDA.

REDETAR - Section hydrologie - 1984 - Le Bras de Cilaos. Hydrométrie différentielle le Pavillon-Canal des Aloes. Etude des apports et du tarissement. Département.

REDETAR - Section hydrologie - 1984 - Site de retenue collinaire n° 15. Le fond Persil. Etude hydrologique. Commune de Trois Bassins.

REDETAR - Section hydrologie - 1985 - Hydrométrie du cône alluvial de la Rivière Saint-Etienne. Département et DDA.

REDETAR - Section hydrologie - 1985 - La dépression cyclonique "Célestina". Etude ponctuelle des précipitations et crues. Additif : la dépression "Géremina". DDA.

REDETAR - Section hydrologie - 1985 - Hydrologie de divers points d'eau pour le développement d'infrastructures rurales du Tampon à Salazie. Région.

REDETAR - Section hydrologie - 1986 - Le bras de la Plaine et ses affluents. Le Pont du Diable. Compte-rendu mission hydrométrique (décembre 1985). Commune du Tampon.

RIVALS P. - 1953 - Les conditions de l'hydrologie à la Réunion ; les problèmes de la recherche des eaux souterraines. Information agricoles n° 9.

ROBERT R. - 1975 - Eléments d'hydrologie des principaux torrents de l'île de la Réunion. Madagascar, Revue de Géographie, 26, janvier-juin 1975, pp. 93-100.

ROBERT R. - 1986 - Climat et hydrologie à la Réunion. etude typologique, étude régionale de l'alimentation et de l'écoulement. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 438 p.

ROUSSET P. - 1982 -Inventaire des puits et points d'eau sensibles à la pollution, utilisés pour l'adduction d'eau potable. Rapport BRGM 82 REU 33.

ROUSSET P., STEENHOUDT M. - 1982 - Synthèse des travaux de recherche d'eaux souterraines pour l'aménagement des Hauts de la Réunion (programme départemental 1980). Contribution méthodologique pour la prospection hydrogéologique dans un strato-volcan basaltique. Rapport BRGM 82 REU 34.

ROUSSET P., STIELTJES L. - 1983 - Schéma directeur de mise en valeur des ressources de lile de la Réunion (période 1984-1988). Rapport BRGM 83 REU 08.

SEDAGRI-BELGROMA - 1965 - Aménagement hydro-agricole du Bras de La Plaine. Section 1 : Etudes hydrauliques. SEDAGRI-BELGROMA-CEE, juin 1965 (+ annexes + cartes).

STEENHOUDT M. - 1980 - Synthèse hydrogéologique de la Plaine des Galets. Rapport BRGM 80 REU 18.

STEENHOUDT M. - 1980 - Plaine des Grègues. Analyse et synthèse des données existantes. Rapport BRGM, 80 REU 07.

STEENHOUDT M. - 1980 - Plaine de l'Entre Deux. Analyse et synthèse des données existantes. Rapport BRGM, 80 REU 08.

STEENHOUDT M. - 1980 - filet de Cilaos. Analyse et synthèse des données existantes. Rapport BRGM, 80 REU 09.

STEENHOUDT M. - 1980 - Notice impact forage. Rapport BRGM, 80 REU 16.

STEENHOUDT M. - 1981 - filet de Cilaos. L'excécution du forage H-CIL dans le contexte des eaux thermo-minérales de Cilaos. Rapport BRGM, 81 REU 01.

STEENHOUDT M. - 1981 - Le Tévelave - Analyse des données existantes. Rapport BRGM, 81 REU 06.

STEENHOUDT M. - 1982 - La plaine des Grègues. Rapport d'exécution du forage de l'étude. Contribution des résultats à la connaissance des eaux souterraines. Rapport BRGM, 82 REU 11.

STEENHOUDT M. - 1982 - La Plaine de l'Entre Deux. Rapport d'exécution du forage. Rapport BRGM, 82 REU 16.

STEENHOUDT M. - 1982 - Zone balnéaire de La Saline - Saint Gilles. Analyse et synthèse des données. Rapport BRGM, 82 REU 24.

STEENHOUDT M. - 1982 - Exploitation des eaux superficielles de l'Etang de Saint Paul. Rapport d'exécution du programme de reconnaissance complémentaire et analyse des modalités de captage. Rapport BRGM 82 REU 09.

STEENHOUDT M. - 1982 - Synthèse des travaux de recherche d'eau souterraine pour l'aménagement des Hauts de la Réunion. Contribution méthodologique pour la prospection hydrogéologique dans un strato-volcan basaltique. Rapport BRGM, 82 REU 34, Département Réunion.

STEENHOUDT M. - 1982 - Programme départemental d'étude des ressources en eau - 1981 : Etang de Saint Paul, exploitation et conséquences ; bilan au ter mars 1982. Rapport BRGM, 82 REU 06, 34 p., Saint Denis.

STEENHOUDT M. - 1983 - filet de Cilaos. Rapport d'exécution de forage d'étude. Contribution des résultats à la connaissance des eaux souterraines. Rapport BRGM, 83 REU 01.

STEENHOUDT M., ROUSSET P. - 1983 - Zone balnéaire de La Saline - SaintGilles. Compte rendu d'exécution du programme des travaux de reconnaissance hydrogéologique. Analyses et perspectives. Rapport BRGM, 83 REU 15.

STEENHOUDT M., ROUSSET P. - 1983 - Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Rapport BRGM, 83 REU 16.

STIELTJES L. - 1984 - Pospection d'eaux souterraines en contexte strato-volcan basaltique océanique, en milieu tropical à file de la Réunion (Océan Indien Occidental). 27ème congrès géologique international, Moscou, août 1984, 1 p.

STIELTJES L. et al. - 1985 - Bilan des ressources, besoin et gestion de l'eau à la Réunion. Rapport BRGM, Saint Denis, 85 REU 19, 29 p.

STIELTJES L. - 1986 - Ressources, besoins et gestion de l'eau à la Réunion. Bilan début 1986. Rapport BRGM, 86 REU 33.

STIELTJES L., STEENHOUDT M., GOURGAND B., DAESSLE M. - 1988 - L'atlas hydrogéologique de la Réunion. Hydrogéologie, BRGM, 1988, n° 2, pp. 81-94.

STEENHOUDT M., CHEMIN J., GOURGAND B. - 1984 - Protection des ressources en eaux souterraines par barrage hydraulique, face à l'impact d'un rabattement de nappe en fouille sur le chantier du nouveau port en Baie de La Possession (La BIBLIOGRAPHIE 387 Réunion). Hydrogéologie, géologie de l'ingénieur 4, 1984,

pp. 355-365, 7 fig. 1 tabl.

TECHER P. - 1982 - Les eaux minérales de Cilaos. Faculté des sciences de Marseille. Hydrologie et climatologie médicale de l'Entre-Deux. Département DDA. Rapport REU 80-08.

TOUCHEBOEUF DE LUSIGNY P. - 1950 - Etude de l'alimentation des nappes souterraines de file de la Réunion. Paris, ORSTOM, 1950 (annuaire hydrologique n° 976).

TOUCHEBOEUF DE LUSIGNY P. - 1960 - Recherches d'eaux souterraines dans la région "sous le vent" de I ile de la Réunion. VI ème journées de l'hydraulique, Nancy, 1960,111,10, 7 p.

Université de La Réunion , laboratoire de géologie - 1984 - Rapport d'activités au Conseil Régional sur le programme d'hydrogéologie "Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de nappes aquifères types de la Réunion. Tranche 1983.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Rapport d'activités au Conseil Régional sur le programme d'hydrogéologie "Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de nappes aquifères types de la Réunion. Tranche 1984.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Etude géologique et hydrogéologique du site de Grand-Etang. Rapport synthétique final pour le compte d'EDF/REAM.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Etude géologique et géophysique en vue de déterminer la faisabilité d'un forage d'exploitation d'eau potable à Saint-Gilles-Les-Bains.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Etude géologique et géophysique en vue de déterminer la faisabilité d'un forage d'eau potable pour la commune des Avirons.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Résultats d'une prospection géophysique complémentaire en vue de déterminer la faisabilité d'un forage d'exploitation pour la commune des Avirons.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Interprétation des pompages d'essai réalisés sur le forage du Brûlé. Commune des Avirons.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1985 - Complément à l'étude géologique et géophysique en vue de la détermination de la faisabilité d'un forage d'exploitation d'eau potable à Saint-Gilles-Les-Bains.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1986 - Etude géologique et géophysique en vue de l'implantation d'un captage d'eau potable entre la Ravine Saint-Gilles et la Ravine de l'Hermitage. Commune de Saint-Paul.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1986 - Etude géologique préliminaire en vue de l'implantation d'une station d'épuration des eaux usées à Saint-Gilles-Les-Bains (Ravine de l'Hermitage). Interprétation des résultats de prospection géophysique.

Université de La Réunion, laboratoire de géologie - 1986 - Télédétection des émergences d'eau douce en mer sur le littoral ouest et sud de l'île de la Réunion par thermographie infra-rouge aéroportée. Rapport de synthèse au Conseil Régional après 1 an d'étude.

A.2.4 Climatologie Bioclimatologie

AUCKENTHALER J. - 1982 - Note sur la relation Insolation/Rayonnement global à la Réunion. IRAT/Saint-Denis, fiche d'essai n° 19, 7 p.

AUCKENTHALER J. - 1982 - L'évaporation d'une nappe d'eau libre à la Réunion. Mesure au bac classe A. Fiche d'essai n° 10, IRAT-Réunion.

AUCKENTHALER J. - 1984 - Le bilan hydrique et l'irrigation de la canne à sucre application à l'étude du périmètre hydro-agricole du Bras de Cilaos. Rapport IRAT, Montpellier, 66 p.

AUCKENTHALER J., MARCHAND J.L. - 1983 - Sommes de températures sur le maïs. IRAT, Saint-Denis, fiche d'essai n° 19, 4 p.

BARGEAS A. - 1982 - Inventaire des données concernant les facteurs hydroclimatologiques relevés sur l'île de la Réunion jusqu'à juillet 1982. Rapport BRGM 82 REU 02.

BARGEAS A. - 1984 - Evaluation globale de la ressource en eau de file de la Réunion ; apports de la simulation par modèles hydrologiques. BRGM, Orléans, 84 SGN 232 EAU/REU.

BENOIST M., DEFOS DU RAU J. - 1975 - Atlas des Départements Français d'Outre-Mer: La Réunion, partie "climatologie".

BERGERON M. - 1989 - Etude comparative du bilan hydrique simulé et du bilan hydrique mesuré avec une sonde neutronique. Application à la culture de la canne à la Réunion. Rapport IRAT, 29 p.

BESSETTE P., DURET M. - 1985 - Pluies génératrices de crues à la Réunion. Supplément 1. Document DDE/Réunion, mars 1985, 87 p.

BOCOUEE F. - 1984 - Analyse statistique des précipitations de janvier à mai 1983 dans les Hauts de file et incidences sur la ressource en eau de surface. DDA, SaintDenis, la Réunion, 17 p.

BOCOUEE F. - 1985 - Etude ponctuelle des précipitations et des crues. DDA, SaintDenis, la Réunion, 31 p.

BOCOUEE F., GIVONNE P. - 1980 - Esquisse hydrométéorologique des effets du cyclone Hyacinthe sur le Département. DDA, Saint-Denis, la Réunion, 14 p.

BOUGERE J. - 1983 - Essai de définition des zones morphoclimatiques à la Réunion. Bull. Labo. Géographie Physique. Université de la Réunion, 1983, n° 3-4, PP 11-23.

BOUGERE J. - 1984 - Comportement du sol et modalités de son évolution (ruissellement et érosion). Labo. Géogr. Phys. Université de la Réunion. CORDET, juin 1984, 67 p.

BOUGERE J., GOPAL A. - 1984 - Bilan hydrique de surface dans les hauts de 'Sainte-Marie (île de la Réunion). Bull. Labo. Géogr. Phys., Université de la Réunion, 1984-2, pp. 1-16.

BOUGERE J., GOPAL A., JANAUD A.M. - 1985 - Rapport d'activité et rapport scientifique du sous-programme : Erosion et bilan hydrique de surface. Laboratoire de Géographie Physique. Université de la Réunion. Tranche 1985, 131 p.

CARRERE A. - 1986 - Aspects climatologiques de la Réunion. Service Météorologique Régional de la Réunion, juin 1986, 90 p.

DURET M. - 1982 - Pluies génératrices de crues à la Réunion. Document DDE/Réunion, 95 p.

ENILORAC M.P. - 1986 - Contribution à l'étude de l'évapotranspiration potentielle sous climat tropical humide et d'altitude. Mémoire ESAT Toulouse, IRAT Montpellier, 76 p. + annexes.

FOREST F. - 1982 - Influence du régime pluviométrique sur le déficit hydrique et la production de la canne à sucre : zone des hauts de Saint-Paul. Rapport IRAT, Montpellier, 80 p.

FOREST F. - 1984 - Rapport de mission agroclimatologie-hydraulique agricole. IRAT Montpellier, 1984, 10 p.

GATINA J.C., HERVE P. - 1979 - Introduction à la métrologie solaire dans l'île de la Réunion. Centre Universitaire de la Réunion, Saint-Denis, 49 p.

GATINA J.C., HERVE P., LEVEAU J. - 1982 - Etude du comportement des capteurs solaires plans dans le

département de la Réunion en fonction des données climatiques particulières à cette région. Rapport de l'Université de la Réunion, SaintDenis, 40 p.

GENERE B. - 1982 - Agroclimatologie appliquée à la canne à sucre sur l'île de la Réunion : approches méthodologique et expérimentale en vue de déterminer la contribution des composantes climatiques et de l'apport d'eau à l'élaboration du rendement. Rapport ENGREF/IRAT, 122 p.

GENERE B. - 1985 - Réseau multilocal de mesures climatiques à la Réunion : pour une connaissance fiable du mésoclimat et l'appui à l'expérimentation agronomique. Agron. Trop. 40 (3) : 202-210, 1985.

GENERE B. - 1985 - Elaboration d'un programme multilocal de recherches agroclimatiques sur canne à sucre à la Réunion. Thèse de Docteur Ingénieur, Montpellier (ENSA Montpellier), 115 p.

GENERE B. - 1987 - Synthèse de 3 ans de mesures climatiques journalières sur station ENERCO 295-11 IRAT/Réunion, fiche d'essai n° 8, 1987, 10 p. + annexes.

GENERE B. - 1988 - Tropicalisation des stations climatologiques automatiques et premiers résultats pour une meilleure maîtrise de l'irrigation à la Réunion. Proposition de communication au symposium sur l'irrigation de la canne à sucre et des cultures associées. Ile Maurice, avril 1988, 26 p.

GENERE B. - 1989 - Zonage du déficit climatique en eau dans les zones de culture de la canne à sucre. IRAT/Réunion. fiche d'essai n° 2, 1989, 10 p.

GENERE B., DEVANNE E. - 1987 - Analyse quantitative des pluies de LigneParadis. Fiche d'essai n° 14/1987. IRAT/Réunion, 9 p.

GENERE B., NATIVEL R. - 1988 - Aanalyse quantitative des pluies de Colimaçons. Fiche d'essai n° 01/1988, IRATIRéunion, 14 p.

GENERE B., NATIVEL R. - 1989 - Répartition de la ressource solaire à la Réunion. IRAT/Réunion, fiche d'essai,n° 01, 1989, 8 p.

GENERE B., PICHOT J., AUCKENTHALER J. - 1982 - Etude régionalisée d'agroclimatologie appliquée à la canne à sucre. Note IRAT/Réunion, 9 p.

GOPAL A. - 1986 - Erosion et bilan hydrique de surface à Beaumont-Les-Hauts (île de la Réunion). Bull. Labo. Géogr. Phys. Université de la Réunion, 1986, 2/3, pp. 125.

GRONDIN F. - 1991 - Prise en compte des paramètres morphométriques pour la cartographie des paramètres pluviométriques à l'île de la Réunion. DAA (INAPG)/IRAT, 62 p.

GRUNBERGER O. - 1987 - Chimie et isotopie comparées des eaux de précipitation et des eaux des sols : évaluation de l'évapotranspiration par le bilan salin et le bilan isotopique à la Réunion. Laboratoire de Géologie, Université de la Réunion. Programme CORDET, rapport de fin d'étude, 40 p + annexes.

IRAT/CIRAD/REUNION - Rapports annuels. Division Irrigation et bioclimatologie. Document IRAT/Réunion/Saint-Pierre.

LE BORGNE J. - 1981 - Y-t-il une périodicité des pluies dans le sud-ouest de l'Océan Indien ? BAGF, 481, 67-74.

LEBRIS G. - 1988 - Aspect climatique de l'île de la Réunion. Microclimats et météorologie locale du sud de l'île. Service météorologique de la Réunion, janvier 1988, 43 p.

LOSSEC B., RANNOU P. - 1979 - La pluviométrie de file de la Réunion. Etude de ses micro-climats. Saintage de recherche, 1979.

LOYNET G. - 1973 - Détermination de l'évapotranspiration potentielle, du besoin en eau d'irrigation, d'une graminée fourragère dans les conditions climatiques du Bras de La Plaine (La Réunion). Revue agricole et

sucrière de file Maurice, pp. 221-231.

LYONNAZ-PERROUX B. - 1982 - Influence des facteurs édaphiques et climatiques sur la croissance de ta canne à sucre. IRAT/Réunion, 46 p. + annexes.

MALICK M., MERCUSOT M. - 1976 - Le fichier des cyclones à la Réunion. La Météorologie, Vlème série, 6, 237-262.

MARLET S. - 1986 - Programme bioclimatologie, irrigation canne à sucre. Sur l'utilisation de l'ETP Penman comme référentiel d'évapotranspiration pour la canne à sucre à la Réunion, à l'aide d'une formule de passage entre l'ETP Penman et l'évaporation d'un bac classe A. Doc. IRAT/Réunion.

MARTIN de VIVIER (Pale) - 1948 - Nomenclature des cyclones ressentis à l 'île de la Réunion (bourbon) depuis 1655. La Météorologie, juillet, sept. 1948, pp. 229-240.

METEOROLOGIE NATIONALE - Service de la Réunion. Bulletins climatologiques mensuels et annuels.

METEOROLOGIE NATIONALE - Service de la Réunion - 1980 - Rapport préliminaire sur le cyclone Hyacinthe.

MEZINO J. - 1985 - Gisement solaire de file de la Réunion. Thèse Sème cycle, Sciences Physiques, Univ. Paris VI, 158 p.

PEREZ P. - 1985 - Bilan hydrique sous canne à sucre sur file de la Réunion. Evaluation de l'information apportée par un radiothermomètre de terrain. Doc. IRAT/Réunion.

REDETAR - Section hydrologie - 1985 - La dépression cyclonique "Célestina". Etude ponctuelle des précipitations et crues. Additif : la dépression Gérémina". DDA Saint-Denis.

ROBERT R. - 1984 - ETP et bilan hydrique des sols à la Réunion. Bull. Lab. Géogr. Ph. Université de la Réunion, 1984, n°3-4, pp. 3-12.

ROBERT R. - 1986 - Climat et hydrologie à la Réunion. Etude typologique, étude BIBLIOGRAPHIE 391 régionale de l'alimentation et de l'écoulement. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 438 p. ROSSIGNOL G. - 1976 -Formules d'assainissement ajustées à la pluviométrie réunionnaise. DDE-CEA.

SURIADIKUSUMAH A. - 1988 - Etude des données du bac de classe A à la Réunion et comparaison avec des données canulées à partir de diverses formules. Mémoire de DAA, ENSA/Rennes, IRAT, 39 p. + annexes.

UNIVERSITE DE LA REUNION - 1982 - Relation d'Angstrom-Black et estimation de l'irradiation globale quotidienne à la Réunion. Note interne, Saint-Denis, 4 p.

UNIVERSITE DE LA REUNION - 1983 - Estimations de rayonnement faites à partir de corrélations. Document interne, Saint-Denis, 23 p.

A.2.5 Végétation - Environnement

ACCT - 1977 - Nomenclature de la faune et de la flore : Afrique au Sud du Sahara, Madagascar, Mascareignes. ACCT, Paris, Hachette, 184 p.

ADEEAR-DAF - 1988 - Inventaire du potentiel de mise en valeur représenté par les zones incultes sur les propriétés privées (hors Domaine ONF). Projet ADEEAR, Saint-Denis, 5 p.

ANONYME - 1982 - Parc naturel de Mafate. Avant-projet de charte. Document, Saint-Denis, 8 p.

ANTOINE E. - 1970 - La forêt tropicale à la Réunion. Info-Nature, Bull. liaison SREPEN, n° spécial: la forêt, Saint-Denis, p. 48-55.

AUBERT DU PETIT-THOUARS A. - 1822 - Historique particulière des plantes orchidées sur les trois files australes d'Afrique, de France, de Bourbon et de Madagascar, Paris, 109 pi.

AUBREVILLE A. - 1972 - les Sapotacées de file de la Réunion. Adansonia, sér. 2, XII, 2 : 337-344.

BADRE F. - 1976 - Les Campanulacées, Flore des Mascareignes. 11ème famille, 18p.

BADRE F., CADET T. - 1971 - Lobeliaceae des Mascareignes. Andansonia, sér. 2, XI, 4 : 667-683.

BADRE F., CADET T., MALPLANCHE M. - 1972 - Etude sytématique et palynologique du genre Heterochaenia (Campanulacées) endémique des Mascareignes. Adansonia, sér. 2, XII, 2 : 267-278.

BADRE F., CADET T. - 1978 - The Pteridophytes of Réunion Island : 349-365.

BAUMER M. - 1978 - La conservation et la valorisation des ressources écologiques dans les files des Comores, de Maurice, de la Réunion et des Seychelles. Document ACCT, 92 p., Paris.

BAUMER M. - 1979 - 1. Corpus élémentaire sur les plantes médicinales des Comores, des Mascareignes et des Seychelles. 2. Compendium des plantes médicinales des Comores, des Mascareignes et des Seychelles. TARE, Montpellier, 2 fasc. 24-118 p.

BAUMER M. - 1981 - Principales menaces contre l'environnement dans les files de l'océan Indien. Bull. liaison, SREPEN, Saint-Denis, 1981, n° 18, p. 9-14.

BOSSER J. - 1981 - Projet de constitution de réserves biologiques dans le domaine forestier de la Réunion. Rapport de mission, ORSTOM, 35 p.

BOUGERE J. - 1988 - Conservation, protection et restauration de l'environnement et de la biodiversité à la Réunion. In : "Actes du Séminaire international sur la gestion de l'environnement. Zone africaine de l'océan Indien", Tamatave, 25 sept-30 oct 1988, MAB, p. 297-301.

BREUIL P. - 1988 - La prise en compte de l'environnement dans les démarches d'aménagement rural à la Réunion. Projet de recherche de Doctorat de Sème cycle, Univ. Tours, Doc. Dactylo. Saint-Denis, 28 p.

CABANIS Y., CHABOUIS L., CHABOUIS F. - 1969 - Végétaux et groupements végétaux de Madagascar et des Mascareignes. BDPA (Tananarive), vol. 1, 389 p.

CADET T. - 1969 - Etudes de la végétaion des zones marécageuses de l'île de la Réunion (océan Indien) Ann. Fac. Sc. Marseille, XLII : 153-164.

CADET T. - 1970 - Etude sur la végétation du Cirque de Cilaos, île de la Réunion, océan Indien : la végétation liée aux cultures. Ann. Fac. Sc. Marseille, XLIV : 79-93.

CADET T. - 1970 - Conséquence des incendies du Grand Bénard ou le prix de l'imprudence. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, n° spécial : la forêt, SaintDenis, p. 29-37.

CADET T. - 1970 - Contribution à l'étude des Composées de la Réunion. I. Les Inulées. Adansonia, sér. 2, X, 2 : 537-551.

CADET T. - 1973 - Histoire d'une forêt de "bois de couleur" dans file de la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, n° spécial : la forêt, Saint-Denis.

CADET T. - 1974 - Etude sur la végétation des hautes altitudes de file de la Réunion (océan Indien) : Végétatio, XXIX, 2 : 121-130.

CADET T. - 1979 - Notes sur les orchidées de file de la Réunion. L'orchidophile 37 1295-1308, photos.

CADET T. - 1980 - A la découverte de la Réunion. vol. 4 (la flore). Editions Favory, la Réunion, 111 p.

CADET T. - 1980 - La végétation de file de la Réunion. Etude phytoécologique et phytosociologique. Imp.

Cazal, Saint-Denis, 1980, 309 p.

CADET T. - 1981 - Fleurs et plantes de la Réunion et de file Maurice. Times Ed. et les Editions du Pacifique. Singapour, 130 p.

CADET T. - 1984 - Plantes rares ou remarquables des Mascareignes. ACCT : 132 p., 48 photos.

CADET T., FiGIER J. - 1990 ? - Etude floristique et écologique de la réserve naturelle de Mare-Longue (Saint-Philippe , Réunion). Info. Nature, Bull. liaison SREPEN, 1990 ? 38 p.

CASTILLON J.B. - 1984 - Orchidées rares ou nouvelles de file de la Réunion. L'orchidophile 61 : 589-591, photo.

CJBM - sans date - Conservatoire et jardin botanique de Mascarin. Un partenaire de développement pour la Réunion. Document CJBM, Saint-Denis, 30 p. + annexes + photos.

CONSEIL GENERAL REUNION - CJBM - 1989 - Dossier : la végétation réunionnaise. 2ème Congrès International des Jardins botaniques pour la conservation : jardins botaniques tropicaux, conservation et développement. 39 p., photos.

CONSERVATOIRE BOTANIQUE DE BREST et SREPEN - 1988 - Réintroduction de Ruiza cordata, plante protégée endémique de file de la Réunion, en extrême limite d'extinction.

DE VILLELE A. - 1896 - Couvert forestier. La Revue Agricole, juin 1896, p. 323-330, Saint-Denis.

DOUMENGE C., RENARD Y. - 1989 - La conservation des éco-systèmes forestiers de I file de la Réunion. UICN, Alliance Mondiale pour la Nature, SREPEN, 1989, 95 p.

DUPONT J. - 1987 - Justification scientifique au projet de réserve naturelle pour la ravine Grande Chaloupe. Document SREPEN, Saint-Denis, 8 p. + annexes 31 p.

DUPONT J. - 1989 - Végétation des zones littorales et sèches. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, Saint-Denis, n° 23 : 89-151.

DUPONT J. - 1989 - Bois de couleurs et autres essences offrant un bois intéressant. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, Saint. Denis, n° 23, p. 152-182.

DUPONT J., GIRARD J.C. - 1988 - La végétation naturelle du Cirque de Cilaos justifications scientifiques du projet de réserve domaniale et propositions de limites. Document SREPEN, Saint-Denis, février 1988, 14 p.

DUPONT J., GIRARD J.C. - 19.. - La sauvegarde des plantes indigènes menacées de la Réunion. Document SREPEN, Saint Denis, 57 p.

DUPONT J., GIRARD J.C., GUINET M. - 1989 - Flore en détresse. Le livre rouge des plantes indigènes menacées à la Réunion. SREPEN - Région Réunion, 133 p.

DUPOUEY J.L., CADET T. - 1986 - Subdivisions de la forêt de bois de couleur à l'île de la Réunion. Ann. Sci. For., 43 (1) : 105-115.

FLORE DES MASCAREIGNES - 10 tomes parus de 1976 à 1985. Comité de rédaction: BOSSER J., CADET T., GUEHO J., MARAIS W.

FRIEDMAN F. - 1977 - Le bois de senteur, arbre très rare de ta Réunion. Info. Nature, Bulletin de liaison de la SREPEN, n° 15, p. 58-62.

FRIEDMAN F. - 1988 - Fleurs rares des files Mascareignes. L'ile aux images, file Maurice, 31 p, 15 planches, photos.

FRIEDMANN F., CADET T. - 1976 - Observations sur l'héterophyllie dans les îles Mascareignes. Adansonia,

sér. 2, XV, 4 : 423-440.

GRUCHET H. - 1977 - Les causes du déboisement de la région ouest aride de fia Réunion. Bull. liaison SREPEN, Saint-Denis, 1977, n° 15, p. 67-70.

HEINE H., HALLE N. - 1970 - Une rubacée des files Mascareinges à feuilles ornementales. Adansonia, sér. 2, X, 3 : 315-327.

HOAREAU H. - 1986 - Protection de la forêt à la Réunion. DEA., Univ. Boraeaux I, 121 p.

INSTITUT DE RECHERCHES FORESTIERES (ZAF) - 1986 - Espèces d'arbres recommandées pour le reboisement et les plantations d'agrément à la Réunion. Institut de recherches forestières (ZAF), 1986, 16 p.

IZNIEFF - sans date - Zones naturelles Informations. Doc. dact. IZNIEFF, Saint 394 BIBLIOGRAPHIE Denis, 2 p.

IZNIEFF - 1985 - Inventaire des zones d'intérêts écologique, faunistique et floristique. Région Réunion. Atlas des zones II : 14 p., 7 cartes.

JACOB DE CORDEMOY E. - 1895 - Flore de l'île de la Réunion. Klincksieck Edit., Paris, 574 p.

JACOB DE CORDEMOY E. - - Révision des orchidées de la Réunion. Revue Générale de Botanique. Tome II, 409-429, planches 6-11.

LAVERGNE R. - 1978 - Les pestes végétales de l'île de la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, Saint-Denis, n° 16 : 9-59.

LAVERGNE R. - 1982 - Orchidées menacées à la Réunion. L'orchidophile 50 : 1721.

LAVERGNE R. - 1989 - Plantes médicinales indigènes, tisanerie et tisaneurs de la Réunion. Thèse Doctorat, Univ. Montpellier 11, 610 p.

LESOUEF J.Y. - 1983 - Compte-rendu de la première mission de sauvetage des éléments les plus menacés de la flore des Mascareignes (La Réunion, Maurice, Rodrigues). WWF-France et Conservatoire Botanique du Stangalarch, Brest, 46 p.

MAC DONALD LA.W. - 1989 - Stratégie de recherche et de gestion pour le contrôle à long terme des pestes végétales à la Réunion. Traduit de l'anglais par C. THEBAUD, Document Fitzpatrick Institute, University of Cape Town, ONF-Réunion, 22 p.

MAILLARD L. -1862 - Notes sur file de la Réunion. Dentu Ed., Paris.

MAILLET A. - 1987 - Les espèces exotiques de reboisement à la Réunion. Rapport Région-Réunion, Saint-Denis, 145 p., 8 fig. 1 tab.

MELVILLE R. - 1970 - L'importance scientifique et le potentiel économique de la flore de la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison SREPEN, n° spécial : la forêt, p. 56-59 MERTZ J. - 1985 - Guide des espèces forestières de Bébour. 143 p., annexes 11 p.

MERTZ J. - 1985 - Etude préliminaire à l'aménagement d'une forêt tropicale d'altitude : la forêt de Bébour. ENITEF, 1985, 105 p. + annexes.

MIGUET J.M. - 1966 - La mystérieuse histoire de la flore de Bourbon. Bull. Acad. Réunion, XXII : 67-75.

MIGUET J.M. - 1970 - Forêt et équilibre biologique. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, n° spécial : la forêt, Saint-Denis, p. 48-55.

MIGUET J.M. - 1982 - Domaine forestier et forêts à la Réunion. ONF, Saint-Denis, 1982, 30 p.

MOUTOU F. - 1981 - Quelques aspects de la flore et de la faune de l'üe de la Réunion. Soc. Biogéogr., 58 (1) :

3-20.

MOUTOU F. - 1983 - Introduction dans les files : l'exemple de file de la Réunion. C. R. Soc. Biogéogr., 59 (2) : 201-211.

MOUTOU F. - 1984 - Nature et protection de la nature à file de la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison SREPEN, Saint-Denis, n° 21 : 45-52.

NOUGIER P. - 1970 - Les origines du peuplement végétal de la Réunion. Info. Nature, Bull. liaison de la SREPEN, n° spécial : la forêt, Saint-Denis, p. 21-28.

NOUGIER P. - 1984 - Excursion géologique et écologique à l'étang du Go1. CDDP, Saint-Denis, 17 p.

ONF - Réunion - Rapports d'activité.

ONF - Réunion - 1985 à 1987 - Documents d'aménagements de Bélouve, (1985) des Hauts sous le vent (1985), de la colorais du volcan (1987).

ONF - Réunion - 1987 - Cirque de Mafate. Guide touristique "découverte et randonnée", 163 p, Saint-Denis.

ONF - Réunion - 1983 - Actes du Colloque de Mafate. Mai 1983.

RAYNAL P. - 1952 - Notes cyperologiques : 17. Révision des Cladium de Madagascar et des Mascareignes. Adansonia, sér. 2, XII, 1 : 103-112.

REGION REUNION - 1982 - L'environnement à l'île de la Réunion. Plaquette 36 p.

REGION REUNION - 1985 - Propositions pour une politique forestière régionale. Conseil Régional rapports; réunion du 12/13 décembre 1985, 11 p. + annexes.

RICHARD A. - 1928 - Monographie des orchidées des îles de France et de Bourbon. Paris, 1-83, 11 planches.

RIYALS P. - 1952 - Etude sur la végétation naturelle de l'île de la Réunion. Thèse, Toulouse, 214 p.

RIYALS P. - 1960 - Les espèces fruitières introduites à file de la Réunion. Publ. Eoole Nat. Sup. Agr. de Toulouse,96 p.

ROUSSIN A. - 1860 - Album de file de la Réunion. Saint Denis, vol. I, 168 p.

SIGALA P. - 1988 - Protection des forêts naturelles de la Réunion. Rapport ESAT, CNEARC, ENGREF, Montpellier, 33 p., 3 cartes.

SIGALA P. - 1988 - Document 1988 - Document préliminaire à la création des trois réserves biologiques domaniales : forêt de Bébour, forêt de La Plaine des Chicots, Vallée du Bras Bémale. Document ONF-Réunion.

SOULERS O. - 1989 - Régénération des bois de couleur des Bas. In : Séminaire sur la régénération des espèces endémiques végétales en voie de disparition dans les files de l'océan Indien. Tananarive, Mantasoa, 27-2 déc. 1989, 4 p.

SREPEN - Bulletins de liaison annuels. Société Réunionnaise pour l'étude et la protection de l'environnement. Saint-Denis, Réunion.

SUSPLUGAS P. - 1969 - Recherches phyto-écologiques sur les savanes de file de la Réunion. Thèse Doct. Univers: Fac. Pharm. Montpellier, 123 p.

SUSPLUGAS J., PRIVAT G., CADET T., SUSPLUGAS P. - 1970 - a) Contributiôn à l'étude des savanes tropicales : savanes de file de la Réunion. b) Les savanes de I file de la Réunion : variation dans la composition floristique. Trav. Soc. Pharm. Montpellier, 30, 1 : 23-36.

TARDIEU-BLOT M.L. - 1960 - Les fougères des Mascareignes et des Seychelles. Nat. Syst., XVI, 1-2 : 151-

201.

THEBAUD C. - 1988 - Le Privet ou ”troëne de Maurice”. Ligustrum robustum var. walkeri, va t-il envahir les forêts de la Réunion? Document Région-Réunion, SaintDenis, 7 p.

THEBAUD C. - 1989 - Contribution à l’étude des plantes étrangères envahissantes à la ’Réunion. Document Région-Réunion, ONF, IRAT.

VASSAL J. - 1969 - A propos des Acacia heterophylla et Koa. Bull. Soc. Füst. Nat. Toulouse, CV: 443-447.

A.2.6 Agronomie - Milieu rural - excepté: phyto-pathologie, sélection variétale, zootechnie

ADEEAR-DAF - 1988 - Evaluation des surfaces en géranium par photointerprétation de la couverture aérienne de 1984.

APR - 1977 - La promotion du milieu rural réunionnais. Saint-Denis, APR, 76p.

APR - 1986 - Manuel du Planteur de géranium. Saint-Denis, Conseil Général de la Réunion, 27 p.

APR - 1988 - Manuel du technicien géranium. IRAT, Saint-Denis, 110 p.

ARTAS - 1988 - Panorama agricole et sucrier - 1978-1988. ARTAS, Sème congrès international 16-23 octobre 1988-201 p.

BABUT J.P., MICHELLON R. - 1988 - Observations sur le comportement des variétés de pommes de terre dans les Hauts sous le vent (La Réunion). Rapport IRAT-CIRAD, Saint-Denis, 6 p.

BECLIN C., DUCREUX A., SIEGMUND B. - 1990 - Détermination de l’énergie ”Proctor” correspondant à l’énergie mise en jeu lors d’une récolte mécanique de la canne à sucre. Cas d’un sol ferrallitiqua. - Etude de la sensibilité au compactage des sols canniers de file de la Réunion par le biais du test ”proctor” adapté. in : ”Mécanisation de la canne à sucre - Recherche et expérimentation en travail du sol à la Réunion” - Bilan 1982-89 - CEEMAT, 1990, p. 7-22.

BECLIN C., DUCREUX A., PERRET S., SIEGMUND B. - 1990 - Travail du sol à la plantation (canne à sucre). In ”Mécanisation de la canne à sucre” - Bilan 1982-89 CEEMAT, 1990, p. 25-39.

BENOIT G., BENARD J.F., HOAREAU A., MANGUIN R. - 1988 - Les difficultés de la relance de la culture du géranium dans les Hauts de la Réunion. Commissariat à l’Aménagement des Hauts, DAF, mars 1988, 33 p.

BERTILE W. - 1979 - Les Hauts de la Réunion. Etude géographique. Université de la Réunion.

BERTILE W. -1987 - La Réunion. Atlas thématique et régional. Ed. Arts Graphiques Modernes. Saint-Denis, 162 p.

BIGOT A. - 1985 - Production fourragère à la Réunion. Résultats acquis par l’IRAT de 1963 à 1985. C1RAD/IEMVT, note n° 1, novembre 1985, 37 p.

BIGOT A. - 1985 - Esquisses des situations d’élevage et de l’Intervention du Développement à la Réunion. CIRAD/IEMVT, note n° 2, décembre 1985, 38 p.

BIGOT A. - 1985 - Productions fourragères à la Réunion : les contraintes st les axes de recherche. CIRADl1EMVT, note n° 3, décembre 1985, 7 p.

BIGOT A., FONTANEL O. - 1988 - Productions fourragères à la Réunion : le point des travaux et perspectives. CIRAD, ”Elevages - fourrages” - Journée d’information du 17 juin 1988, 11 p.

BOUTILLY V. - 1898 - Le thé. Sa culture et sa manipulation. Ed. Carré et Naud, Paris, 1898, 108 p.

BREUIL P., HOAREAU A., HOAREAU J.M., PAYET J. - 1988 - La culture du géranium dans les Hauts de l'Ouest, s'adapter ou disparaître. Atelier "géranium/érosion", Région et Département de la Réunion, 97 p.

BRIDIER B. - 1983 - Contribution à l'étude des structures de fonctionnement des exploitations agricoles à géranium des Hauts de l'Ouest. Doc. IRAT-REUNION, 1983, 51 p.

BRIDIER B. - 1983 - Contribution à l'étude des structures et du fonctionnement des exploitations agricoles des Hauts de l'Ouest. Document IRAT, Saint-Denis, 68 p.

BRIDIER B. - 1985 - Quel avenir pour le géranium et le développement agricole des Hauts de l'Ouest de la Réunion. L'Agron. Trop., 40 (4) : 342-356.

BROSSIER J., MARSHALL E. - 1985 - La dynamique des systèmes de production agricoles dans l'aménagement des Hauts de file. Observations et propositions. C.R. de mission à l'île de la Réunion. 22 juillet-7 août 1985, INRA-SAD-Dijon, 1985, 79 p.

BROUWERS M., DUCREUX A. - 1986 - Objectifs de recherche en matière de physique et travail du sol à la Réunion ; proposition de programmes et action de recherche. Doc. CIRAD LAGEPHY n° 1, 41 p.

BUTTIN J.P. - 1989 - Nutrition de la canne à sucre de la Réunion. Mémoires d'Ingénieurs de Techniques agricoles. Document IRAT-Réunion.

CAUMONT A. - 1980 - Etudes sur les possibilités d'une petite motorisation en cultures maraîchères et vivrières à la Réunion. Rapport annuel CEEMAT 1980, p. 30-107 CDDP (Centre Départemental de Documentation Pédagogique) - 1983 - SaintPierre, Le Tampon, La Plaine des Cafres (histoire de la commune de StPierre).CNDP-CRDP-CDDP, numéro spécial, 1983, 196p., Saint-Denis.

CDDP (Centre Départemental de Documentation Pédagogique) - 1984 - La Chaloupe Saint-Leu. Naissance d'un village des Hauts de I ile de la Réunion. CNDPCRDP, 1986, 139p., Saint-Denis.

CDDP (Centre Départemental de Documentation pédagogique) - 1986 - Saint-Paul. Données historiques et géographiques. CNDP-CRDP-CDDP, 1986, 139p., SaintDenis. CEEMAT - Réunion - rapports annuels CEEMAT - 1987 - Recherches de voies de mécanisation pour les Hauts de l'Ouest. Rapport annuel CEEMAT, 1987, p. 103-127.

CERF -1984-1988, rapports annuels 1984 à 1988. Saint-Denis-la Réunion.

CHABALIER P.F., HELLMANN M., PICHOT J. - 1984 - Nutrition de la canne à sucre dans plusieurs écologies à la Réunion. Sème Congrès de la STASM, oct. 84, île Maurice, p. 178-186.

CHABALIER P.F. - 1988 - Schéma de fumure sur canne à la Réunion. In Sème congrès international 16-23 octobre 1988 - ARTAS "Panorama agricole et sucrier" 1978-1988. p. 162-168.

CHABALIER P.F., GAUDY F. - 1988 - Influence de la fertilité du sol et de la fertilisation NPK sur les rendements et la nutrition de la canne à sucre. Sème Congrès ARTAS, oct. 88, la Réunion, p. 368-382.

CHABALIER P.F. - 1990 - Organisation et impact du conseil en fertilisation. L'exemple CIRAD à la Réunion. In : "actes des journées de la DRN" - 12-15 septembre 1989. Ed. IRAT-Montpellier -1990.9 p.

CHAPOT H. - 1952 - Le combava, citrus de la Réunion et de Madagascar. RIBH1952/07-08, n° 357-358, p. 377-385.

CHASTEL J.M. - 1986 - Suivis d'exploitations dans les Hauts de l'Ouest. Doc. IRATSaint-Denis, 12 p.

CHASTEL J.M. - 1987 - Place du géranium dans les agricultures des Hauts de l'Ouest. Doc. IRAT-Saint-Denis, 21 p.

CHASTEL J.M. - 1988 - La mécanisation des exploitations de taille moyenne en zone canne à la Réunion. Sème Congrès ARTAS, oct. 88, la Réunion, p. 269-279.

CHASTEL J.M. - 1988 - La mécanisation des exploitations cannières. Le cas des exploitations de taille moyenne. Rapport IRAT-Saint-Denis, décembre 1988, 62 p.

CHASTEL J.M. - 1988 - Les exploitations agricoles face à l'échéance 1992. L'exemple des exploitations cannières. Note IRAT-Réunion Saint-Denis.

CHASTEL J.M., GIGNOUX I. - 1988 - La production de géranium à la Réunion. Evolution et perspectives. Doc. IRAT-Saint-Denis, 11 p.

CIRAD - 1985 - Bilan de la Recherche Système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Journées du 25 au 27 novembre 1985. CIRAD-Réunion, 365 p.

CIRAD - 1985 - Notes sur les principales cultures des Hauts sous le vent. Doc. IRAT, 1985. 118p.

CIRAD - 1987 - Le CIRAD à La réunion. Réalisation et perspectives. CIRAD-SaintDenis, novembre 1987.

CIRAD - 1988 - Des chercheurs chez les paysans : La Réunion, le Brésil, Madagascar. Plaquette CIRAD-IRAT.

CiRAD - 1988 - Les andosols de file de la Réunion. Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires. Séminaire de Saint-Denis, 24 mai-ter juin 1988. 231 p.

CLARIOND A., PERRET S., SIEGMUND B. - 1990 - Décompaction en interligne pendant la culture (canne à sucre). Lutte contre la compaction et fertilisation localisée. In "Mécanisation de la canne à sucre". Bilan 1982-89 -CEEMAT, 1990. p.43-65.

CLEMENT D. - 1982 - De la plantation du géranium au maraîchage, transformation et continuité. Rapport d'une étude de cas, effectué auprès d'habitants créoles de Tan Rouge. Saint-Denis, DDA, 276 p.

CLOUET Y. - 1983 - Etude préalable d'un montage de terrain. Recherchedéveloppement-formation à file de la Réunion. Compte-Rendu de mission du 28 juin au 13 juillet 1983. Rapport GERDAT, Montpellier, 1983, 44 p.

COLLAUDIN L., MATHEfiON G., CHABOEUF N. - 1990 - Rapport de mission "élevage" dans le département de la Réunion. 9-16 juin 1990 IEMVT/CiRAD/ITEB/INRA juillet 1990, 22 p.

COMMISSARIAT A L'AMENAGEMENT DES HAUTS - Assises de l'Aménagement des Hauts, mai 1990.

COMMISSARIAT A L'AMENAGEMENT DES HAUTS - 1990 - Aménager les Hauts. Plaquette CAH, mai 1990, 29 p.

COSTES E. - 1988 - Analyse architecturale et modélisation du litchi (Litchi chinensis Bonn.). Contribution à l'étude de son irrégularité de production à file de la Réunion. Thèse Doctorat d'Université. USTL, Montpellier 1988, 258 p.

COURCOL C. - 1987 - Les systèmes de culture intercalaires du géranium rosat dans BIBLIOGRAPHIE 399 les Hauts de l'Ouest à la Réunion. Rapport de stage - CNEARC/IRAT, 104 p.

COUTERON P. - 1987 - Lutte contre l'érosion à la Réunion. Rapport DAF, la Réunion.

C.T.LC.S. - Notes et rapports divers.

DADANT R. - 1974 - IRAT - 12 ans de recherches agronomiques à la Réunion. Agron. Trop. 29 (11), 1974, p. 1159-1192.

DANFLOUS J.P. - 1988 - Mécanisation du semis et de la récolte des cultures vivrières et maraîchères. "Contrat de Plan recherche agronomiqe : cultures vivrières et maraîchères". Journée d'information du 7 avril 1988. CIRAD -7 p.

DAVID O. - 1989 - Réalisation et critique d'un référentiel technico-économique à la Réunion en vue d'une politique de rationalisation de l'installation des jeunes agriculteurs réunionnais à partir de janvier 1990. Mémoire

DAA-CNEARCMontpellier, octobre 1989, 248 p.

DDA-REUNION - 1967 - Développement de la culture du thé dans file de la Réunion. Etude préliminaire. DDA-Saint-Denis, décembre 1967, vol. 1-3, 158 p.

DE CAMBIAIRE J. - 1983 - La certitude du développement : une référence mutualiste à la Réunion. Atya-Paris, 1983, 286 p.

DEFOS DU RAU J. - 1960 - L'île de la Réunion. Etude de géographie humaine. Thèse Fac. Lettres Bordeaux, 726 p.

DEFOS DU RAU J. - 1972 - Deux expériences agricoles à la Réunion : géranium et thé. In : Table ronde sur les types de cultures commerciales paysannes en Asie du Sud-Est, à Madagascar et dans les Mascareignes. Bordeaux, CNRS/CEGET, 7-9 sept. 1972, p. 279-297.

DELPORTE A. - 1989 - Optimisation de l'aménagement hydro-agricole du Bras de Cilaos à file de la Réunion. Prise en compte des ressources en eau et des caractéristiques hydro-mécaniques des terrains agricoles et des exigences des cultures. Analyse prospectiviste de la zone tant sur le plan économique que technique. Rapport BCEOM.

DEQUAIRE J. - 1980 - La culture et la préparation de la vanille à la Réunion. Coop. Agric. des producteurs de vanille de la Réunion. Février 1980 - 43 p.

DEREVIER A. - 1980 - Mécanisation de la culture de la canne à sucre à la Réunion. "Machinisme agricole tropical", n° 73 - 1980, p. 21-35.

DEVANNE E. - 1987 - Effets du sevrage en eau pendant les derniers mois de culture sur le rendement et la richesse de la canne à sucre à la Réunion. Rapport CNEARCMontpellier, 1987, 60 p.

DEVERRE C. - 1987 - Enjeux fonciers dans la Caraïbe, en Amérique Centrale et à la Réunion. Plantations et paysanneries. Séminaire international, Pointe-à-Pitre, 21 24 novembre 1983. INRA, 1987, 232 p.

DE VILLELE A. - 1895 - Organismes de la nitrification. Organismes des nodosités des légumineuses. La Revue Agricole, octobre 1895, p. 212-220, Saint-Denis.

DE VILLELE A. - 1896 - Champ d'expérience de Saint-Gilles-Les-Hauts : Variété Leroy (caféier Arabisa). La Revue Agricole, janvier 1897, p. 39-48, Saint-Denis.

DE VILLELE A. - 1897 - Sable calcaire. La Revue Agricole, janvier 1897, p. 7-18, Saint-Denis.

DE VILLELE A. - 1899 - Du calcaire et de la chaux dans l'agriculture coloniale. La Revue Agricole, septembre 1899, p. 385-398. Saint-Denis.

DE VILLELE A. - 1901 - La culture de l'arachide. La revue agricole, juillet 1901, p. 303-306, Saint-Denis.

DE VILLELE A. - 1902 - La forme des matières fertilisantes qui conviennent le plus économiquement à la Réunion. La Revue Agricole, juillet 1902, p. 380-385, SaintDenis.

DE VILLELE A. - 1903 - Le rapport de la station agricole de la Réunion. La Revue Agricole, avril 1903, p. 153-156, Saint-Denis.

DOREE J.F. - 1989 - Inférât du travail minimum avec couverture dans les systèmes de culture des Hauts de l'Ouest de la Réunion. Rapport de stage, CNEARC, 1989, 96 p + annexes.

DUCREUX A. - 1987 - Appui aux programmes de recherche à file de la Réunion. Thème : le travail du sol. Mission du 15/7 au 5/8 1987. Document CEEMAT/LAGEPHY n ° 4, 1987, 17p. + annexes.

DU HAMEL de MILLY A. - 1981 - Etude de la variété Sâipan 17 pour expliquer les chutes de rendement. Rapport de DAA-ENSA Montpellier n° 167, 34 p. + annexes.

FAVRE O. - 1983 - Analyse d'un essai d'intensification de l'élevage bovin en pâturage permanent à la Réunion. Rapport IEMVT-GERDAT, Maisons-Alfort, 1983, 63 p.

ELLIAUTOU J.M. - 1987 - Dynamique de développement dans les secteurs prioritaires du programme général d'Aménagement des Hauts ; CAH, Réunion, 1987, 214 p.

FRITZ J. - 1967 - Recherche de carences minérales des sols de la Réunion en vases de végétation. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. tananarive, 19-25 nov. 1967, 10 p.

FRITZ J. - 1971 - Recherches sur les productions fourragères effectuées par l'IRATRéunion (1963-1970). Docu. IRAT-Réunion, 1971, 28 p.

FRITZ J. - 1973 - Possibilités de développement des productions fourragères à la Réunion. Rev. Agric. Suc. Ile Maurice, 52, 1973, p. 186-193.

FRITZ J. - 1973 - Possibilités d'augmentation de la production des pâturages naturels des Hauts de la Réunion; Fourrages 55, 1973, p. 77-81 FRITZ J. - 1973 - Fertilisation potassique de canne à sucre et de Chloris gayana à la Réunion. Agron. Trop. 1973, n° 11, vol. XXVIII, p. 1035-1048.

FRITZ J., LOYNET G. - 1973 - Facteurs agissant sur l'efficience des engrais azotés, en production intensive de fourrage de Chloris gayana. "Fourrages", n° 55, sept. 1973.

GAILLARD J.P. - 1985 - Recherche agronomique et productions fruitières à la Réunion. Bilan et nouvelles perspectives. Rapport IRFA-Montpellier, 1985, 65p. + annexes.

GAILLARD J.P. - 1989 - Evaluation et orientation du programme de recherches sur fruitiers. Rapport de mission à file de la Réunion du 9 au 23 octobre 1988. Rapport IRFA, Montpellier, janvier 1989, 53 p.

GARIN P. - 1983 - Etudes des itinéraires techniques rencontrés dans les systèmes d'exploitation à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de file de la Réunion. Possibilités d'appropriation des innovations techniques par les agriculteurs. Mémoire DAA, CNEARC, Montpellier, 119 p. + annexes.

GARIN P. - 1987 - Systèmes de culture et itinéraires techniques dans les exploitations à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de file de la Réunion. Agron. Trop., 1987, 42-4, p. 289-300.

GARIN P., MICHELLON R. - 1984 - Analyses de composts de géranium. IRATSaint-Denis, fiche d'essai n° 15, 5 p.

GARIN P., HEBERT A., MICHELLON R. - 1986 - Observations sur les adventices effectuées dans le cadre de la Recherche-Développement dans les Hauts de l'Ouest. Rapport IRAT-CIRAD, mars 1986, 24 p.

GENERE B. - 1985 - Suivi de cannes à sucre irriguées au goutte à goutte à la Réunion. Agron. Trop. 40-4, 1985, p. 286-297.

GIBON A., ROUX M., VALLERAND F. - 1988 - Eleveur, troupeau et espace fourrager. Contribution à l'approche globale des systèmes d'élevage. INRA-France, mars 1988, n° 11, 144 p.

GIGNOUX I. - 1988 - Analyse évolutive et prospective de la production de géranium à la Réunion. Mémoire ITA du CNEARC, Montpellier, novembre 1988, 109 p.

GILIBERT J. - 1981 - Productions fourragères en plein champ à la Réunion. Quantités, qualités. EDE-La Réunion, février 1981, 147p.

GRISONI M., CABEU P., AUBERT B. - 1989 - Résultats de douze années d'un essai de comportement de cinq porte-greffe en association avec quatre cultivars d'agrumes à l'île de la Réunion. "Fruits", 1989, vol. 44, n° 10, p. 529-538.

GROENE D. - 1989 - Action concertée de lutte contre l'érosion des sols agricoles à la Réunion. C.R. de mission du 20 juin au 9 juillet 1989, CTFT/CIRAD.

GUEBOURG J.L. - 1989 - ”Petite île”: une commune agricole de l’île de la Réunion en mutation. Cahiers d’Outre-Mer, 1989, vol. 42, n° 166, pp; 189-209.

HAINZELIN E. - 1984 - Le maïs à la Réunion. In : International conference on Indian Ocean Studies”, 5-12 décembre 1984 (Perth. Australia) et document IRAT/GERDAT, 1984, 14 p.

HENRIETTE C. - 1986 - Contribution à l’étude des systèmes d’exploitation de la Réunion. essai de typologie filière canne à sucre. Cah. Statitiques agricoles, 1986, n° 5-6, p. 3-5.

HENRY J.L.- 1984 - Land resettlement schema in Reunion. Results and prospects. In : ”Huitième congrès STASM -15-19 octobre 1984. Rev. Agric. et Suc. de lite Maurice (MUS), 1984, vol. 63, n° 2-3, p. 155-162.

HERIN G. - 1988 - Problématique du développement de la production de tabac brun à la Réunion. Propositions pour son amélioration et introduction de la culture de tabac blond de type ”Virginie”. Mémoire CNEARC, Montpellier, janvier 1985, 188 p.

HOAREAU M. - 1980 - Les cultures industrielles. In : ”Encyclopédie de la Réunion”, p. 67-82.

IEMVT - CIRAD - 1985 - Identification de thèmes de recherche-développement pour l’établissement d’un programme d’activités en agro-pastoralisme à la Réunion. Rapport IEMVT-Maisons Alfort, octobre 1985, 22 p.

IFREMER/REUNION - 1986 - Etude des potentialités agricoles du complexe EtangMarais de Saint-Paul (île de la Réunion). Rapport final - 114 p - Conseil Régional.

IRAT - CIRAD - Réunion - Rapports annuels.

MAHEU F., PHILOTE A. - 1984 - Comparaison d’espèces et de variétés tropicales de graminées et de légumineuses fourragères à la Station de La Bretagne. IRATSaint-Denis, fiche d’essai n° 17, 7 p.

MAILLOT M.H. - 1971 - La culture du géranium et son influence sur l’économie de l’île de la Réunion. Maitrise de Géographie - Université Aix-Marseille, 119 p MARIOTTI A. - 1952 - La culture du géranium et du vetyver à la Réunion. B.T.I: n° 75.

MAUNIER E. - 1932 - Les plantes à parfum des Colonies Françaises. Institut Colonial, Marseille, 1932, 122 p.
.

MAURICE L. - 1988 - Opération géranium - diversification. Rapport de stage à la Chambre d’Agriculture, SUAD, Hauts de l’Ouest, Trois-Bassins, 31 p + annexes.

MAZOT J.L. - 1987 - Formation tractoriste SICA - canne - Ile de la Réunion, épierrage fin. Rapport CEEMAT-CIRAD, 1987, 19 p.

MICHELLON R. - 1978 - Le géranium rosat à la Réunion : l’intensification de sa culture et les perspectives d’amélioration génétique. Agron. Trop. 33, (1), 1978, p. 80-89.

MICHELLON R. - 1982 - Essais au champ de production de haricots secs chez les attributaires SAFER de la Commume de Trois-Bassins. Document IRAT, SaintDenis, 84 p.

MICHELLON R. - 1983 - La patate douce (Ipomea batatas) : l’intensification de sa culture à la Réunion. ISHS Ninth Africa Horticultural Symposium, 27-29 juillet 1983, 12 p.

MICHELLON R. - 1984 -Inoculation du haricot dans les Hauts sous le vent. IRATSaint-Denis, fiche d’essai n° 4, 4 p.

MICHELLON R. - 1984 - Fumure et inoculation du haricot dans les Hauts sous le vent. IRAT, Saint-Denis, fiche d’essai n° 19, 7 p.

MICHELLON R. - 1984 - Proposition de collaboration entre le CIRAD, le SUAD, la SAFER et l’APR. Mise

en place d'essais chez les agriculteurs. Doc. IRATColimaçons, 10 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Comportement de diverses fétuques élevées dans les Hauts sous le vent. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 8, 11 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Comportement de diverses graminées fourragères de Nouvelle-Zélandes dans les Hauts de l'Ouest. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 20, 10 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Comportement de divers bromes dans les Hauts sous le vent. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 6, 10 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Comportement de divers ray-grass dans les Hauts sous le vent. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 13, 35 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Comportement et réponse du kikuyu à l'azote et au chaulage dans les Hauts sous le vent. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 12, 30 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 -Implantation et comportement de crucifères fourragères dans les Hauts sous le vent. IRAT-Saint-Denis, fiche d'essai n° 7, 14 p.

MICHELLON R., RASSABY A. - 1984 - Observations sur le comportement de variétés de pomme de terre dans les Hauts sous le vent. Fiche d'essai IRAT Réunion, n° 11.

MICHELLON R., JEANNE J. - 1988 - Observations sur le comportement de 'la pomme de terre dans les Hauts sous le vent. Essais mis en place avec l'APR. IRATSaint-Denis, Fiche d'essai n° 7, 1988, 14 p.

MICHELLON R., BABUT J.P. - 1988 - Les cultures vivrières dans les systèmes de production des Hauts de l'Ouest. "Contrat de plan recherche agronomique : cultures vivrières et maraîchères" Journée d'information du 7 avril 1988. CIRAD, 20 p.

MICHELLON R., HEBERT A., GARIN P. - 1986 - Tests par les agriculteurs de nouvelles techniques de culture du géranium rosat dans les Hauts de l'Ouest. IRATRéunion, fiche d'essai n° 24, 16 p.

MICHELLON R., BABUT J.P., PERRET S., PIROT R. - non daté - Systèmes de cultures dans les sols andiques. Doc. CIRAD, Saint-Denis, 18 p.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE - 1987 - Conseils de désherbage en cultures maraîchères à la Réunion : bilan de 4 années d'expérimentation en cultures maraîchères. Ministère de l'Agriculture, 1987, 40 p.

MUELLER W. - 1965 - Ascension et déclin d'une île productrice de café (en Allemand). Kaffeeund Tee Market (DEU), vol. 15, n° 12, p. 9-10.

OUF H. - 1987 - Les perspectives de mécanisation dans les Hauts de l'Ouest. Mémoire fin d'Etudes ISTOM-CEEMAT, 105 p.

PAILLAT J.M. - 1985 - Identification des voies de mécanisation dans la zone de Montagne : "Hauts de l'Ouest". In : "Bilan de la recherche - système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion" - 25-27 nov. 1985, CIRAD, p. 244-287.

PAILLAT J.M. - 1987 - Mécanisation de la récolte du géranium - Mise au point d'une machine adaptée. CEEMAT-Réunion - Journée "Géranium" - 15 décembre 1987 8 p + annexes.

PAILLAT J.M. - 1990 - Mécanisation des exploitations en zone de montagne à la Réunion. Doc. CEEMAT, sept. 1990.

PAILLAT J.M. - 1990 - Installation des prairies à la Réunion. Doc. CEEMAT, sept. 1990.

PAILLAT J.M. - 1990 - Récolte et conservation des fourrages à la Réunion. Doc. CEEMAT-Réunion, sept. 1990.

PAILLAT J.M., PERRET S. - 1988 - Synthèse des travaux réalisés par le CEEMAT pour la mécanisation des productions fourragères. Doc. CEEMAT-Réunion, avril 1988, 36 p.

PAILLAT J.M., PERRET S. - 1988 - Travail du sol pour l'implantation des prairies dans les Hauts de la Réunion. CEEMAT-REUNION. Rapport annuel 1988, p. 111123.

PARE J. - 1965 - Aménagement hydro-agricole du Bras de La Plaine : conservation des sols (section IV, titre II). IRAT/SEDAGRI, 129 p, juin 1965.

PARE J. - 1965 - Aménagement hydro-agricole du Bras de La Plaine : champs de comportement (section IV, titre III). IRAT/SEDAGRI, 38 p, juin 1965.

PARISOT E. - 1985 - Description et résultats des expérimentations menées actuellement sur fruitiers tempérés à la Réunion. Rapport IRFA, Montpellier, 1985, 35 p.

PARISOT E. - 1988 - Premiers résultats d'une étude écophysiologique et agronomique du pécher à la Réunion. Rapport IRFA-CIRAD-Saint-Pierre, la Réunion, mars 1988, p. 1-24.

BIBLIOGRAPHIE 405 PERDRIOLLE V. - 1987 - evolution des exploitations agricoles attribuées par la SA-FER dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Rapport de stage INPSA/CNEARC/IRAT, 128 p.

PICHOT J. - 1981 - Analyse de fumier de géranium. Fiche d'essai n° 44, IRATREUNION, 2 p.

PICHOT J., HELLMANN M. - 1983 - Action de recherche concertée CERF-IRAT sur la nutrition de la canne à sucre. Résultats de la campagne 81. Fiche d'essai n° 23, IRAT REUNION, 31 p. + annexes.

PICHOT J., HELLMANN M. - 1983 - Pré-enquête sur la teneur des cannes usinables en oligo-éléments. Action concertée CERF-IRAT sur la nutrition de la canne à sucre. Fiche d'essai n° 25, IRAT-REUNION, 4 p.

PICHOT J., HELLMANN M., ANDRIEU P., BOYER de LA GIRAUDAY - 1983 Adaptation aux conditions de la Réunion du système de diagnostic et de recommandation intégré (DRIS) appliqué à différents tissus de la canne à sucre. In Rapport annuel 1982 du CERF, p. 36-44.

PIROT R. - 1985 - La mécanisation des cultures dans les Hauts de l'Ouest. In "Bilan de la recherche - système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion". 25-27 nov. 1985, CIRAD, p. 223-241.

RAMALINGON AL. - 1988 - Développement rural intégré dans les Hauts de l'île de la Réunion. In : "Actes du séminaire international sur la gestion de l'environnement. Zone Africaine de l'Océan Indien" Tamatave, 25 sept. - 3 oct. 1988, MAB, p. 253256.

REGION-REUNION - 1985 - Schéma d'aménagement régional. Contribution à son élaboration. DDA-DEE-Février 1985, 142 p.

REGION-REUNION - 1989 - Mode d'occupation du sol en 1984.8 cartes à l'échelle du 1/25.000.

REGION-REUNION - 1990 - Schéma d'aménagement régional. Cahier 2 : l'avenir, mars 1990, 197 p + cartes.

REIGNIE D. - 1988 - Réflexions sur l'avenir de l'agriculture des Hauts de l'Ouest. Rapport de stage SAOE/DAF, 39 p.

REMY P. - 1984 - Le haricot sec et la diversification des Hauts de l'Ouest de la Réunion. Mémoire DAA, montpellier, IRAT, 107 p.

REMY J.C. - 1988 - Quelques problématiques agronomiques des andosols de la Réunion. In : "Séminaire sur les andosols de file de la Réunion", 24 mai-ter juin 1988, Saint-Denis, p. 173-183.

ROBEQUAIN C. - 1947 - Les "Hauts" de la Réunion. Bull. Ass. Géogr. Fr., janv-fév. 1947, n° 183-184, 10 p.

SAFER - Rapports d'activité.

SARAGONI H. - 1973 - Aperçu sur quelques résultats obtenus par l'IRAT-Réunion en matière de recherches tabacoles. Rev. Agr. Sucr. Ile Maurice, 1973, 52, 203-213.

SARAGONI H. - 1980 - Combustibilité du tabac cultivé sur des sols à caractères andiques de file de la Réunion. Agron. Trop. 35 (3), 1980, p. 297-330.

SARAGONI H. - 1981 - Comment produire des plants sains de tabac à la Réunion. Fiche d'essai IRAT-Réunion, n° 31, 6 p.

406 BIBLIOGRAPHIE SARAGONI H. - 1981 - Manuel du planteur de tabac. Bilan des recherches effectuées de 1963 à 1981 sur les tabacs bruns séchés à l'air et destinés à la coupe. Rapport IRAT-Réunion, 62 p.

SEDAGRI-BELGROMA - 1965 - Aménagement hydro-agricole du Bras de La Plaine. Section II : Etudes statistiques de la démographie et de la structure foncière. Monographie agricole du périmètre (titres I à V). SEDAGRI-BELGROMA-CEE, juin 1965, 529 p.

SEGUY L. - 1985 - Rapport de mission à la Réunion du 3 au 9 mai 1985. Doc. IRAT, 15 p.

SEGUY L. - 1988 et 1989 - Notes techniques d'appui au programme de recherches des Hauts de l'Ouest à la Réunion. Doc. IRAT, 10 et 9 p.

SERVANT J. - 1988 - Les progrès de la recherche agronomique et l'agriculture de demain. Quels enjeux et quelles perspectives pour la Réunion ?. Doc. IRAT/CIRAD. Exposé devant le comité économique et social de La Région Réunion le 23 août 1988, 28 p.

SIEGMUND B., PERRET S. - 1988 - Mécanisation de la canne à sucre : plantation, épierrage fin, récolte, lutte contre le ver blanc, sensibilité au compactage. Doc. CEEMAT, 1988, 37 p + annexes.

SUAD - Rapports.

SUAD-Réunion - 1979 - Données économiques concernant la mise en place d'un hectare d'ail - Observations (octobre 1978). La Réunion Agricole, n° 162, 5-6.

SUAD-Réunion - Chambre d'Agriculture - Les cultures maraîchères (fiches techiques). Imprimerie Cazal, Saint-Denis, 68 p.

TARDY A. - 1982 - Programme général d'aménagements des Hauts : Saint-Leu. Potentiel agricole et orientations d'aménagement. DDA-ADEEAR-IRAT, 1984, 78 p.

TARDY A. - 1982 - Programme général d'aménagement des Hauts: Hauts de TroisBassins. Potentiel agricole et orientations d'aménagmenents. DDA-ADEEAR-IRAT, 1982 , 46 p + 3 cartes au 1 /25.000.

TARDY A. - 1982 - Programme général d'aménagement des Hauts : Hauts de SaintPaul. Potentiel agricole et orientations d'aménagement. DDA-ADEEAR-IRAT, 1982, 58 p.

TARDY A. - 1984 - Programme général d'aménagement des Hauts. Potentiel agricole et orientation d'aménagement. Saint-Denis, DDA, 3 tomes.

TARDY A. - 1985 - La recherche-système vue par le développement. In : "Bilan de la Recherche-Système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion", 25-27 nov. 1985, CIRAD, p. 335-365.

TARDY A., CHASTEL J.M. - 1988 - Evaluation économique du progrès agricole à la Réunion 1970/1988. In : "Congrès ARTAS", 3 octobre 1988, 18 p.

VALY A. - 1989 - Analyse technico-économique des systèmes de production géranium à la Réunion ; les conditions sociales et économiques de l'intensification au sein des petites exploitations. Chambre d'Agriculture, 78 p.

VALY A., BOUCHER J.F., MICHELLON R., LEROULLE S. - 1983 - Essai démonstration pour la production

de haricot sec dans les Hauts de Saint-Joseph (Grand Coude), juillet 1982, janvier 1983, IRAT, Saint-Denis, 1983, 30 p.

VANBERCIE R. - 1961 - La culture du tabac dans l'île de la Réunion. Doc. IRAT, Paris, 1961.

A.2.7 Andosols - Sols volcaniques - Produits "amorphes" jusqu'en 1984)

AGUILERA N. - 1969 - Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Mexico. In : "Panel on volcanic ash soils in Latin America", A. 6, Inter American Inst., Agr. Sc., Turrialba, Costa Rica.

AHMAD N., PRASHAD S. - 1970 - Dispersion, mechanical composition and fractionation of West Indian Yellow Earth Soils (Andepts). J. Soil Sci., I : 63-71 ALLBROOK R.F. -1983 - Some physical properties of allophane soils from the North Island, New Zeland. N.Z. Journal of Science, 26, p. 481-482.

ALLBROOK R.F. - 1984 - Physical properties of volcanic ash soils. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, 1984, p. 1-10.

ALVARADO A., BUOL S.W. - 1975 - Toposéquence relations of dystrandepts in Costa Rica. Soit Sci. Soc. Am., Proc. 39, p. 932-937.

AMAND Y. - 1981 - Phosphorus status of some Andosols in Japan. J.A.R.O., 15, I 14-21.

AOMINE S., YOSHINAGA N. - 1955 - Clay minerais in volcanic ash soils in Japan, Soil Sc!. : 349-358.

AOMINE S., JACKSON M.L. - 1959 - Allophane determination in andosoils by Cation Exchange Capacity Delta Value. Soil Sci. Amer. Proc., 23 : 210-214.

AOMINE S., MIYAUCHI N. - 1962 - Clay minerai from diallage in warm and humid climats. Soil Sc!. Plant Nutrit. Jap., 8, 5 : 186-190.

AOMINE S., WADA K. - 1962 - Differential weathering of volcanic ash and pumice resulting in formation of hydrated halloysite. Amer. Mineralogist., 47, 9-10 : 10241048.

AOMINE S., KAWASAKI H. - 1963 - Vermiculite in some japanese soils. Soil Sc!. Plant Nutrit. Jap., I : 18-27.

AOMINE S., KAWASAKI H. - 1963 - Influence of dispersion treatments on the properties of soil colloids. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 9, 6 : 238-243.

AOMINE S., MIYAUCHI N. - 1963 - Age of the youngest hydrated halloysite in Kyushu. Nature, Lond., 199 : 1311-1312.

AOMINE S. MIYAUCHI N. - 1965 - Imogolite of imogo-layers in Kyushu. Soil Sci. Plant Nutrit. II, 5 : 28-35.

AOMINE S., WADA K. - 1966 - Grade of weathering and fertility of volcanic ash soils of Aso volcano. Soil Sci. Plant Nutrft., 12, 2 : 73-79.

AOMINE S., EGASHIRA K. - 1968 - Floculation of allophanic clays by electrolytes. Soil Sc!. Plant. Nutrit. Jap., 14, 3 : 94-98.

AOMINE S., OTSUKA H. - 1968 - Surface of soit allophanic clay Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelaïde, I : 731-737.

AOMINE S., EGASHIRA K. - 1970 - Heat of immersion of soil allophane clays. Soil Sc!. Plant. Nutr., 16, 5 : 204-211.

AOMINE S., MIZOTA C. - 1973 - Distribution and genesis of imogolite in volcanic ash soils of Northern Kanto, Japan. Proceed. Int. Clay Conf. Madrid, 1972, in J.M. Serratosa Ed. : 207-213.

APPELT H., COLEMAN N.T., PRATT P.F. - 1975 - Interactions between organic compounds, minerais and ions in volcanic ash derived soils. Effects of orgarüc compounds on the absorption of phosphate. Soil Sc. Amer. Proc. (39), 628-630.

ARIAS A.H., GUERRERO R.R. - 1971 - Algunas propriedados fisicas de dos suelos derivados de cenizas volcanicas de Pasto, Colombia, determinadas por diferentes metodos. Turrialba (Costa-Rica), 21, 4 : 393-403.

ASKENASY P.E., DIXON J.B., Mc KEE T.R. - 1973 - Spheroidal halloysite in a Guatemalan Soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37 : 799-803.

AUBERT G. - 1965 - Classification des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., III, 3 : 269288.

BADAUT D. - 1981 - Néoformation de smectites à partir de frustules de diatomées. Le cas des lacs salés à l'Altiplano de Bolivie. Mise en évidence par des techniques de microscopie électronique. Thèse Sème cycle Univ. L. Pasteur, Strsabourg, 73 p., 13 pl.

BARRAT B.C. - 1971 - Micromorphology of some intrazonal soils of New Zealand. New Zealand J., Sci., 14, 3 : 698-733.

BARRON P.F., WILSON M.A., CAMPBELL A.S., FROST R.L. - 1982 - Detection of imogolite in soils using solide state. 28Si NMR. Nature, London, 299 : 616-618.

BECH-BORRAS J., QUANTIN P. et SEGALEN P. - 1976 - Etude des andosols d'Olot (Gerona, Espagne). 1 ère partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques - 2ème partie : caractéristiques minéralogiques, conclusions. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. XIV, I : 73-87 et 2 : 95-111.

BECH-BORRAS J. FEDOROFF N. et SOLE A. - 1977 - Etude des Andosols d'olot (Gerona, Espagne). Sème partie : micromorphologie. Cah ORSTOM, séri. Pédol., XV, 4 : 381-390.

BENAVIDES G. de - 1983 - Cuantificacion del material amorfo en algunos suelos derivados de cenizas volcanicas y su relacion con los parametros de la taxonomia de suelos. Suelos equatoriales, 13 (2). En prensa.

BENAYAS J., FERNANDEZ-CALDAS E., TEJEDOR-SALGUERO M.L., RODRIGUEZ R.A. - 1980 - Caracteristicas micromorfologicas de los suelos de una climatosecuencia de la vertiente meridional de la Isla de Tenerife. Anal. Edafologia Agrobiol., XXXIX, 1-2 : 51-74.

BERTRAND R. - 1969 - Les sols des formations volcaniques de l'Hérault. Thèse Sème cycle, Paris IRAT, 102 p. multigr.

BESOAIN E.M. - 1964 - Clay formation in some chilean soils derived from volcanic materials. New Zeal. J. Sc!., 7 : 79-86.

BESOAIN E.M. - 1968 - Imogolite in volcanic soils of Chile. Geoderma, 2 : 151-169.

BESOAIN E.M., SERRATOSA J.M., HIDALGO A. - 1964 - Espectros de absorption infraroja de la fraccion arcilla de suelos volcanicos de Chile. Anal. Edafol., Agro-biol., 23, 7-8 : 293-303.

BIROT P., CAILLERE S., HENIN S. - 1959 - Etude du problème des premiers stades de l'altération de quelques roches. Ann. Agron., 103 : 257-265.

BIRREL K.S. - 1961 - The absorption of cations from solution by allophane in relation to their effective size. J. Soil Sci., 12 : 307-316.

BIRREL K.S. - 1961 - Ion fixation by allophane. New Zeal. J. Sci., 4 : 393-414.

BIRREL K.S. - 1964 - Voir FAO, 1964 : 11-27 et 74-81.

BIRREL K.S. - 1966 - Determination of clays content in soifs containing allophane. New Zeal. J. Agric. Res., 9, 3 : 554-564.

BIRREL K.S., FIELDES M. - 1952 - Allophane in volcanic ash soifs. J. Soif Sci., 3, 1 156-166.

BIRREL K.S. GRADWELL M. - 1956 -Ion exchange phenomena in some soifs containing amorphous minerai constituants. J. Soif Sci., 7 : 130-147.

BISQUE R.E. - 1962 - Clay polymerization in carbonate rocks : a silicification reaction defined. Nat. Conf. clays. Clay Min., 9, 1960, Lafayette, Indiana: 365-374.

BLAKEMORE L.C., SEARLE P.L., DALY B.K. - 1981 - Methods for chemical analysis of soifs. New Zeland Bureau Sci. Rep. 10 A, DSIR, New Zeland.

BONFILS P. - 1972 - Caracterisation des andosols de l'Escandorgue et des sols bruns andiques du Lodevois. Bull. A.F.E.S., 1972, 3 : 112-127.

BONFILS P., MOINEREAU J. - 1971 - Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au sud du Massif Central. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IX, 3 345-363.

BORIE F., ZUNINO H., - 1983 - Organic matter-phosphorus association as a sink in P-fixation processes in allophanic soifs of Chile. Soif Biol. Biochem., 15 (5), 599-604.

BOWDEN J.W., POSNER A.M., QUIRCK J.P. - 1980 - Adsorption and charging phenomenes in variable charge soifs. In : B.K.G. THENG ed. Soif with variable charge, New Zealand, Soc. Soif Sc., 147-166.

BRIGATTI M.F. - 1981 - Hisingerite, a review of its crystal chemistry. Int. Clay Conf., Bologna, 1981 : 97-110.

BRINDLEY G.W., PEDRO G. - 1970 - Rapport du Comité International de nomenclature A.LP.E.A. des minéraux argileux. Tokyo, 1969, Bull. Gr. fr. Argiles, XXII : 1-4.

BRINER G.P., JACKSON M.L. - 1969 - Allophanic material in Australian soifs derived from Pleistocène basait. Aust. J. Soif Res., vol. 1 : 163-169.

BRINER G.P., JACKSON M.L. - 1970 - Mineralogical analysis fo clays in soifs developed from basalts in Australia. Israël J. Chem., 8, 3 : 487-500.

BROADBENT F.E., JACKMAN R.H., Mc NICOLL J. - 1964 - Mineralization of carton and nitrogen in some New Zealand allophanic soifs. Soif Sci., 98 : 118-128.

BROUWERS M., LATRILLE E. - 1974 - Etude des terres cultivées de l'île d'Anjouan (Archipel des Comores). Approche morpho-pédologique en vue de la définition des contraintes et des propositions culturales. Agron. Trop., 29, 2-3 : 212-257.

BRUCKERT S., HETIER J.M., GUTIERREZ F. - 1974 - Dynamique de l'humification des andosols du Massif Central français et des Iles Canaries : Caractérisation physico-chimique des complexes organo-minéraux. Bull. Assoc. Fr. Et. Sol, Sci. du Sol, 1974, 4 : 225-245.

BRYDON J.E., DAY J.H. - 1969 - Use of the Fieldes an Perrott sodium fluoride test to distinguish the B horizons of podzols in the field. Cah. J. Soif Sci., vol. 50 : 35-41.

CABEZAS-VIANO O. -1975 - Estudio mineralogico (fraccion ¡2 w) de los andosoles de las Islas Canarias. Thesis, Univ. La Laguna, Tenerife.

CAILLERE S., HENIN S. RAUTUREAU M. - 1982 - Cours de minéralogie des argiles, 2è édition. Masson, Paris.

CALHOUN F.G., CARLISLE V.W., LUNA C. - 1970 - Micromorphology and genetic interpretation of selected colombian andosols. Dept. Soils, Univ. Florida, Gainesville, USA - Dept. Inst. Géogr. A. Codazzi, Bogota, Colombia.

CALHOUN F.G., CARLISLE V.W., MEJIA L. - 1970 - Unique micromorphological characteristics of Colom-

bian andosols - mêmes références.

CAMPBELL A.S., MITCHELL B.D., BRACEWELL J.M. - 1968 - Effect of particle size pH and organic malter ont the thermal analysis of allophana. Clay Mine., 7 : 451454.

CAMPBELL A.S., YOUNG A.W., LIVINSTONE L.G., WILSON M.A., WALKER T.W. 1977 - Characterization of poorly-ordered alumino-silicate in a vitric andosol from New Zealand. Soil Sci., 123, 6 : 362-368.

CAMUS G. KIEFFER G. - 1979 - Les couches rouges ("Red partings") du massif volcanique des Coffrons (Ardèche, France). Géologie Méditerranéenne, VI.

CARRASCO A., SADZAWKA A. - 1984 - Importancia del pH en suelos chilenos derivados de cenizas volcanicas. Congress internacional de suelos volcanicos (La Laguna), p. 83-100.

CAVALLARO N., ETCHEVERS J.D., DONATO GARCIA L. - 1984 - The nature of the volcanic material from the chichonal volcano (Mexico) and its affects on agricultural production. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, p. 250-263.

CHAPELLE J. - 1985 - Les sols du Rwanda. Séminaire national sur la fertilisation. Ministère de l'Agriculture, Kigali, Rwanda.

CHITOSHI MIZOTA, CHAPELLE J. - 1988 - Characterization of some andepts and andic soils in Rwanda (Central Africa). GEODERMA, 41 (1988), p. 193-209.

CHU A.C., SHERMAN G.D. - 1952 - Differential fixation of phosphate by typical soils of the Hawaüan great soit groups. Univ. Hawaii agric. Exp. : St. Bull., n° 16, 20 p.

CHUKHROV F.V., BERKMIN S.L, ERMILOVA L.P., MOLEVA V.A., RUDNITSKAYA E.S. - 1964 - Le problème des allophanes. Izvest. Akad. Nauk. SSSR, sér. Géol., 4 3-19 (en russe).

CHUKHROV F.V., ZVJAGIN B.B., RUDNITSKLAYA E.S., ERMILOVA L.P. - 1966 Sur la nature et la génèse des halloysites. Izvest Akad. Nauk SSSR, sér. Géol., 5 3-20 (en russe).

CHUKROV F.V., ZVJAGIN B.B. - 1966 - Halloysite a cristallochemically and mineralogically distinct species. Int. Clay Conf., 1966, Jérusalem, I : 11-25.

CHUKHROV F.V. et al. - 1973 - New data on iron oxides int the weathering zone. Proc. Int. Clay Conf., 1972, Madrid, I : 24-32, (déf. ferrihydrite).

CHUKHROV F.V. et al. - 1976 - Mineralogical criteria in the origin of marine ironmanganuse nodules. Minerai. deposita Berl., II : 24-32 (déf. ferroxyhite).

CLEMENT B. - 1970 - Etude des propriétés physique des andosols et des sols andiques : recherche de corrélations entre les propriétés mécaniques et la rétention d'eau. DEA de Pédologie, Fac. Sci. Montpellier, 30 p.

CLINE M.G. et al. - 1955 - Soil survey of the territory of Hawaii. Soil Conserv. Service, US Dépt. Agr., 644 p.

LOOS P., HERBILLON A., ECHEVERRA J. - 1968 - Allophane-like synthetic silicoalumina, phosphate adsorption and availability. 9. Int. Congr. Soit Sci., VCongr. 1968, Adelaïde, Il: 733-743.

CLOOS P., LEONARD A.J., MOREAU J.P., HERBILLON A., FRIPIAT J.J. - 1969 Structural organization in amorphous silico-alumina. Clays and clay minerais, vol. 17 : 271-287.

COLEMAN J.D., FARRAR D.M., MARSH A.D. - 1964 - The moisture characteristics composition and structural analysis of a red clay soit from Nyeri, Kenya. Géotechnique, 14 : 262-276.

COLMET-DAAGE F. - 1981 - Andisols of Central and South America. 4th Int. Soit classification workshop, Rwanda, July 1981.

COLMET-DAAGE F., CUCALON F. - 1965 - Caractères hydriques de certains sols des régions bananières d'Equateur. Fruits, 20, 1 : 19-23.

COLMET-DAAGE F., LAGACHE P. - 1965 - Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 111, 2 : 91-121 COLMET-DAAGE F. et al. - 1967 et 1969 - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques - 1 ère partie: Cah. ORSTOM, sér. Pédol., V, 1 : 3-38. - 2ème partie: Cah. ORSTOM, sér. Pédol., V, 4 : 353-391. - 2ème partie: Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VII, 4 : 493-560.

COLMET-DAAGE F. et al. - 1970 - Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. VIII, 2 : 113-172.

COLMET-DAAGE F., GAUTHEYROU J. et M., de KIMPE C., FUSIL G. - 1972 Dispersion et études des fractions fines des sols à allophane des Antilles et d'Amérique Latine. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., X, 2 : 169-191 et 3 : 219-242.

COLMET-DAAGE F., GAUTHEYROU J. et M., SEGALEN P. - 1973 - Etude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique Latine, à l'aide d'une technique de dissolution différentielle. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XI, 2 97-120.

COLMET-DAAGE F. et al. - 1974 - Caractéristiques et propriétés hydriques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques du Chili-Central. ORSTOM-Antilles n° 84, 115 p. multigr.

COLMET-DAAGE F., GAUTHEYROU J. - 1974 - Soit associations on volcanic material in tropical America, with special reference to Martinique and Guadeloupe. Trop. Agric. (Trinidad), 51, 2 : 121-128.

CONEA A. - 1972 - Andosols in Rumania. Prvi Natsionalen Kongres po, pochvoznanie, Bulgarie, 1969, p. 465-472.

C.P.C.S., France - 1967 - Classification des sols. Note ENSA Grignon, 67 p. multigr.

C.P.C.S., Groupe de Travail Andosols - 1972 - Proposition de classification des andosols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., X, 3 : 302-303.

CORTES A., FRANZMEIER D.P. -1972 - Weathering of primary minerais in volcanic ash derived soils of the Central Cordillera of Colombia. Géoderma, 8, 2-3 : 165-659.

CORTES A., FRANZMEIER D.P. - 1972 - Climatosequence of ash-derived soils in the Central Cordillera of Columbia. Soit. Sc!. Soc. Amer. Proc., 36, 4 : 653-659.

CRADWICK P.D.G., FARMER V.C., RUSSEL J.D. - 1972 - Imogolite a hydrated aluminium - silicate of tubular structure. Nature, Phy. Sci., London, 240 : 187-189.

DALRYMPLE J.B. - 1974 - The application of soit micro-morphology to the recognition and interpretation of fossil soils in volcanic ash deposits from the North Islands, New Zealand. "Soit micromorphology" Proc. II int. work-meeting on Soli Micromorphology Arnhem. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, London, New York: 3399 DIXON J.B., Mc KEE T. - 1974 -Infernal and externat morphology of tubular and spheroidal particles. Clays CI. Miner., 22 : 127-137.

DIXON J.B., Mc KEE T.R. - 1974 - Spherical halloysite particles in a volcanic ash soit of Mexico. 10th Int. Congr. Soit Sci., Moscou, VII : 115-124.

DIXON J.B., WEEDS S.B. et al. - 1977 - Minerais in soit environments. Soit Sci. Soc. Amer., Madison USA, 948 p.

DUCHAUFOUR Ph. - 1972 - Processus de formation des sols. Biochimie et géochimie. Colt. Et. et Rech., Nancy, 184 p.

DUCHAUFOUR Ph. - 1977 - Pédologie I ; Pédogénèse et classification. Masson, Paris.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B. - 1966 - Note sur une méthode combinée d'extraction de l'aluminium et du fer libre dans les sols. Science du sol, 1 : 17-31.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B. - 1966 - Sols andosoliques et roches volcaniques des Vosges. Sci. de la Terre, XI, 3 : 345-365.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B. - 1979 - Pédologie II ; Constituants et propriétés du sol. Ed. dirigée par M. BONNEAU et B. SOUCHIER. Masson, Paris.

DUDAL R., SOEPRAPTOHARDJO M. - 1960 - Some considerations on the genetic relation-ship between latosols and andosols in Java (Indonesia). Trans. Vllth, Int. Congr. Soit Sci, Madison, IV-V: 229-237.

DUDAS M.J., HARWARD M.E. - 1975 - Weathering and authigenic halloysite in soils developed in Mazama ash. Soit Sci. Soc. Am. Proc., 39 : 561-566.

DULCE R.A.J., SANTACRUZ M.M. - 1971 - Propriedades fisicas de algunos suelos volcanicos des altiplano de Ipiales. Tesis Univesidad de Narino.

DUPUIS J., HOREMANS P. - 1966 - Observations sur quelques sols du Massif Central. Ann. Inst. Nation. Agron., IV: 317-375.

ECKSTEIN Y., YAALON D.H., YARIV S. - 1970 - The effect of lithium on the cation exchange behaviour of crystalline and amorphous clays. Israël J. Chem., 8, 3 : 335342.

EDELSTEIN-HELLER D. et al. - 1974 -Caractérisation chimique de certains sols formés sur matériaux volcaniques des Carpates orientales (Roumanie). Anal. Inst. Stud. Cercetari Pedol. (Román), 1972, XL : 347-373.

EGASHIRA K., AOMINE S. - 1974 - Effects of drying and heating on the surface area of allophane and imogolite. Clay Sci., 4, 5 : 231-242.

EGAWA T. - 1977 - Properties of soils derived from volcanic ash. In : "soils derived from volcanic ash in Japan", by YOSHIAKI ISHIZUKA and CA. BLACK ; CIMMYT, Mexico. Ch. 2 : 10-63.

EGAWA T., OSHIKAMO Y. - 1963 - Vermiculite type clay minerais in sonie "Kuroboku" soit distributed in Mia Prefecture, of West Japan. Soit Sci. Plant. Nutrit. Jap., 9, 3 : 111-116.

EGAWA T., SATO A., NISHIMURA T. - 1960 - Release of OH ions from clays minerais treated with varions anions, with special reference to the structure and chemistry of allophane. Adv. Clay. Sci., 2 : 252-262.

ESCART J. - 1951 - Les méthodes d'adsorption. a) adsorption des gaz. Bull. Gr. Fr. Argiles, 3 : 79-84.

ESCHENA T., GESSA C. -1967 - Gli andosuoli delta Sardagna. Studi Sassari, 15, 2: 363-386.

ESCHENA T., SOLINAS V. - 1969 - Gli andosuoli del Vulcano Laziala. Studi Sassari, 17, 3 : 279-301.

ESCOVAR G., JURADO R., GUERRERO R.R. - 1972 - Propriedades fisicas de algunos suslos derivados de cenizas volcanicas del Altiplano de Pasto, Narino (Columbia). Turrialba (Costa Rica), vol. 22, 3 : 338-346.

ESPIAU P.- 1987 - Contribution à l'étude du complexe absorbant des sols acides à charges mixtes. Application aux andosols du Velay. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIII, n° 2, 1987, p. 79-94.

ESPINOZA W., GAST R.G., ADAMS R.S. - 1975 - Charge characteristics and nitrate retention by two andepts from South-Central Chile, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39, p. 842-846.

ESWARAN H. - 1972 - Morphology of allophane, imogolite and halloysite. Clay min., 9 : 281-285.

ESWARAN H., de CONINCK F. - 1971 - Clay minera) formations and transformations in basaftic soils in tropical environments. Pedologie Gand, XXI, 2 181-210.

ESWARAN H., STOOPS G., de PAEPE P. - 1973 - A contribution to the study of soit formation on Isla Santa Cruz, Galapagos (Chili). Pédologie (Gand), XXIII, 2 : 100122.

FAO - UNESCO - 1964 - Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, juin 1964. World Soil Resources reports, 14. FAO-UNESCO, 169 p.

Scope of volcanic Ash Soils, their extent and distribution by M. OHAMASA p. 7 The ”Andosols” or ”humic Allophane” Soils of South America, by A.C.S. WRIGHT p. 9 Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador by M. RICO p.23 The Andosols in Indonésia, by TAN KIM HONG p.30 Hawaüan soils from volcanic ash, by D. SHERMAN, L.D. SWINDALE p.36 Volcanic ash soils of Korea, by SHIN YONG HWA p.50 Volcanic ash soils of the Philippines, by J.A. MARIANO p.53 Genesis and morphology of volcanic ash soils, by M. OHMASA p.56 Genesis and morphology of ash-derived soils in the United States of America, by K. FLACH p.61 Properties of volcanic ash soils, by K. KOBO p.71 Some properties of volcanic ash soils, by K.S. BIRELL p.74 The properties of soils derives Il rom volcanic ash, by L.D. SWINDALE p.82 Mineralogical properties of volcanic ash soils in Japan, by T. EGAWA p.89 Volcanic ash soils of Chile, by E. BESOAIN p.92 FAO-UNESCO - 1974 - Soil map of the world, 1/5.000.000. Vol. I, Legend, 59 p., Paris, modifié 1985, revised legend, multig. 115 p. Rome, 1985.

FARMER V.C., FRASER A.R., RUSSEL J.D., YOSHINAGA N. - 1977 - Recognition of imogolite structures in allophanic clays by infrared spectroscopy. Clay Min., 12, I 55-57.

FARMER V.C., FRASER A.R., TAIT J.M., PALMIERI F., VIOLANTE P. NAKAI M., YOSHINAGA N. - 1978 - Imogolite and prolo-imogolite in an italian soit developed on volcanic ash. Clay Min., 13, 3 : 271-274.

FARMER V.C., FRASER A.R., TAIT M. - 1979 - Characterization of the chemical structures of natural and synthetic aluminosilicate gels and soils by infrared spectroscopy. Geochim. Cosmochim. Acta, 43 : 1417-1420.

FARMER V.C., FRASER A.R. - 1979 - Synthetic imogolite, a tubular hydroxyaluminium silicate. Int. Clay Conf., 1978, Elsevier Sc. Publ. Comp., Amsterdam 547-553.

FARMER V.C., RUSSEL J.D., BERROW M.L. - 1980 - Imogolite and protoimogolite-allophane in spodic horizons : evidence for a mobile aluminium-silicate complex in podzol formation. J. Soil Sci., 31 : 673-684.

FARMER V.C., SMITH B.F.L., TAIT J.M. - 1977 - Alteration of allophane and imogolite by alkaline digestion. Clay Min., 12, : 195-198.

FARMER V.C., SMITH B.F.L., TAIT J.M. - 1979 - The stability, free energy and heat of formation of imogolite. Clay Min., 14, 2 : 103-107.

FASSBENDER H.W. - 1969 - Phosphorus deficiency and fixation in volcanic ash soils in Central America. Panel of Volcanic ash in Latin America, july 6-13, Turialba, Costa Rica.

FERNANDEZ-CALDAS E., BENAYAS J., ALONSO J.J. - 1975 - Influencia del medio ecologico en la micromorfologia de Andosuelos (I. Tenerife), con special referencia a la materia organica y fraccion arcilla. Anal. Edafol. Agrobiol. XXXVI, 1-2 : 77.

FERNANDEZ-CALDAS E., TEJEDOR SALGUERO M.L. - 1975 - Andosoles de las Islas Canarias. Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Santa Cruz de Tenerife, n° 29, 210 p.

FERNANDEZ-CALDAS E., QUANTIN P., TEJEDOR SALGUERO M.L. - 1978 Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2ème partie : caractéristiques minéralogiques, interprétation et classification. Cahiers ORSTOM, série Pédol., XVI, I : 37-46.

FERNANDEZ-CALDAS E., QUANTIN P., TEJEDOR SALGUERO M.L. - 1981 Séquences climatiques de sols dérivés de roches volcaniques aux Iles Canaries. géoderma, 226, 1 : 47-62.

FEY M.V., LE ROUX J. - 1977 - Properties and quantitative estimation of poorly crystalline components in sesquioxidic soit clays. Clays CI. Miner., 25 : 285-294.

FIELDES M. - 1955 - Clay mineralogy of New Zealand soils, Part. 2 : allophane and related colloïdes. New Zealand J. Sci. Techn. B, 37 : 336-350.

FIELDES M. - 1962 - The nature of the active fraction of soils. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 62-78.

FIELDES M. - 1966 - The nature of allophane in soils. I. Significance of structural randomness in pedogenesis. New Zeal. J. Sci., 9 : 599-607.

FIELDES M., CLARIDGE G.G.C., 1975 - Allophane in soit components, chap. 10,: 351-393. ED. J.E. Gieseking Springer-Verlag -, New York, Beidelberg.

FIELDES M., FURKERT R.J. - 1966 - The nature of allophane in soit : 2. Differences in composition. New Zeal. J. Sci., 9 : 608-622.

FIELDES M., PERROT K.W. - 1966 - The nature of allophane in soils : 3. Rapide field and laboratory test for allophane. New. Zeal. J. Sci., 9 : 623-629.

FIELDES M., SCHOFIELD R.K. - 1960 - Mechanism of ion adsorption by inorganic soit colloids. New Zeal. J. Sci., 3 : 563-579.

FLACH K.W., HOLZHEY C.S., DE CONINCK F., BARTLETT R.J. - 1980 - Genesis and classification of andepts and spodosols. Chapter 20, soils with variable charge, BKG, Theng (Ed.), NZ, Soc. Soil Sci. p. 411-425.

FLACH K.W. et al. - 1980 - Genesis and classification of Andepts and Spodosols, in Theng, "soils with variable charge". New Zealand Society of Soil Science: 411-426.

FOSBERG M.A., FALEN A.L. et al. - 1979 - Physical , chemical and mineralogical characteristics of soils from volcanic ash in Northern Idaho. I, Morphology and genesis. Soil Sci. Soc. Am. J., 43 : 541-547 ; II, Phosphorus sorption id., p. 547 et suivantes.

FOX R.L. et al. - 1968 - Phosphate requirements of Hawaüan Latosols and residual affects of fertilizer phosphorus. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelâide, vol. II : 301310.

FOX R.L. - 1980 - Soils with variable charge : agronomic and fertility aspects. In B.K.G. THENG (ed.), Soils with variable charge. New Zeland, Soc. Soil Sc., p. 195224.

FRET E. - 1978 - Andepts in some high mountains of East Africa. Geoderma 21, p. 119-131.

FRET E. - 1981 - Filtrations-Verlagerung 14C Markierter organischer Substanz in einerm Andosol am Mt Kenya. BUII. B.G.S., 5 : 21-28.

FUJISHIMA R.Y., FAN P.F. - 1977 - Hydrothermal mineralogy of Keolu Hills, Oahu (Hawâi . Amer. Mlneralog., 62, 5-6 : 574-582.

FURKERT R.J., FIELDES M. - 1968 - Allophane in New Zealand soils. Int. Congr. Soil Sc!. 9, 1968, Adelâide vol. III : 133-141.

GALINDO G.G., OLGUIN C., SCHALSCHA E.B. - 1971 - Phosphate sorption capacity of clay fractions of soils derived from volcanic ash. Géoderma, 1 : 225-232.

GALLARDO J.E. et al. - 1973 - Sobre ta presencia y caracterizacion de andosuelos en la Sierra de Francia (Espana). Anal. Edafol. Agrobiol., 32 : 1135-1141.

GALLARDO J.F., GARCIA SANCHES A., SAAREDRA J. - 1973- Properties of andosols of the Sierra de Francia (Western Spain). Anales Edafol Agrofiol, 32, p. 1135-1141.

GAUTHEYROU J. et M., COLMET-DAAGE F. - 1976, 1977, 1981 Chronobibliographie signalétique et ana-

lytique des sols à allophane. 1 ère période 1809-1972, T I index, 158 p., T II chronobibliographie, 322 p. 2ème période : 19731975, T III, index et chronobibliographie - Reprise à jour annuelle en 1978, 79, 80 et 81 jusqu'aux références de 1981. Publ. multigr. Bureau des Sols des Antilles (ORSTOM).

GENSE C. - 1970 - Premières observations sur l'altération de quelques roches des hautes terres malgaches. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VIII, 4 : 451-467.

GENSE C. - 1970 - Altération du basalte dans une basse colline de la côte est de Madagascar (unité morphologique de cette région). Cah. ORSTOM, sér. Géol., II, 2, 241-258.

GIBBS H.S. - 1968 - Volcanic ash soils in New Zealand. New Zeal. Dept. Sci. Industri. Res. Inform., ser. n° 65, 39 p.

GONZALES-BATISTA A. - 1978 - Estudio de las cargas permanentes y variables en los suelos de Tener'rfe. Tesis doctoral, Univ. La Laguna.

GONZALES-BATISTA A., HERNANDEZ-MORENO J.M., FERNANDEZ-CALDAS E., HERBILLON A.J. - 1981 -Influence of silica content on the surface charge characteristics of allophanic clays. Clays and Clay miner. 29, 6.

GONZALEZ-BATISTA A., HERNANDEZ-MORENO J.M., FERNANDEZ-CALDAS E. - 1980 - Caracteristicas electroquimicas de andosoles. II. Punto cero de cargâ y retention ionica. Anal. Edaf. Agrob. XXXIX, 5-6 : 835-843. III Conducrimetria, id. XXXIX, 7-8 : 1175-1180.

GONZALEZ M.A., GAVANDE S.A. - 1969 - Propriedades fisicas de algunos suelos dedicados al cultivo de la cana de azucar en Costa Rica. Turrialba (Costa Rica), 19, 2 : 235-245.

GONZALEZ-MARTINEZ S.P., BESOAIN E.M. - 1976 - Minerales 2:1 y 2:2 en suelos volcanicos de Chile. 2 -Suelos derivados de loba riolitica en la region central. Ciencia e Investigacion Agraria, 3, 2-3 : 129-137.

GONZALEZ DE VALLEJO L.L, JIMENEZ SALS J.A., LEGUEY JIMENEZ S. - 1981 Engineering geology of the tropical volcanic soils of La Laguna, Tenerife. Engineering Geology, 17 : 1-17.

GRANDJEAN E - Relation entre la genèse, la minéralogie des fractions fines et le comportement hydrique d'une séquence de sols développée sur roches volcaniques récentes. Basse Terre (Guadeloupe). INRA (Versailles), 78 p.

GRANDJEAN E., CABIDOCHE Y.M., ROBERT M., TESSIER D. - 1984 - Effect of the total hydric behaviour on that of some guadeloupean andosols. Congreso internacional de suelos volcanicos, La Laguna, 1984, p. 27-42.

GREENLAND D.J., QUIRK J.P. - 1962 - Surface area of soil colloids. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 79-87.

GREENLAND D.J., WADA K., HAMBLIN A.P. - 1969 - Imogolite in Papua. Austr. J. Soil Sci., 32 : 56-58.

GRIFFITH S.M., SCHNITZER M. - 1975 - Analytical characteristics of humic and fulvic acids extracted from tropical volcanic soils. Soil Sci. Soc. Am. Proceedings, 39 (5), p. 861-867.

GUERRERO R., HERNANDO PABON S. - 1984 - La déterminacion rapida de material amorfo y su aplicacion en el diagnostico de suelos volcanicos en Columbia. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna (1984), p. 151-163.

GUNJIGAKE N., WADA K. - 1981 - Eftects of phosphorus concentration and pH on phosphate retention by active Aluminium and Iron of ando soils. Soil Sci., 132, 5 347-352.

GUTIERREZ-JEREZ F., BORGES-PEREZ A., del CASTILLO T.J. - 1980 - Estudio del fosforo assimilable en andosoles de las Islas Canarias. Anal. Edafol. Agrobiol., XXXI II : 2165-2173.

GUVEN N., LAFON G.M., LEE J. - 1981 - Experimental hydrothermal alteration of albite to clays : preliminary results. Int. Clay Conf., Bologna, 1981 : 495-511.

HAATJENS H.A., REYNDERS J.J., MOUTHAN W.L.P.J. - 1967 - Major soit groups of New Guinea and their distribution. Common. Dep. Agric. Res. R. Trop. Inst., 55, 87 p.

HARVARD M.E., BORCHARDT G.A. - 1969 - Mineralogy and trace elements composition of ash and pumice soils in the Pacific North West of the United States (USA). Panel. Volcan. Ash Soils Latin America : B5 : 1-12.

HASIMOTO L, JACKSON M.L. - 1960 - Rapid dissolution of allophane and kaolinitehalloysite alter deshydratation. clays CI. Min., 7 : 102-113.

HENMI T., PARFITT R.L. - 1980 - Laminar opaline silica from some volcanic ash soils in New Zealand. Clays clay Miner., 2b: 57-60.

HENMI T., WADA K. - 1976 - Morphology and composition of allophane. Amer. Minerai., 61 : 379-149.

HENMI T., YOSHINAGA N. - 1981 - Alteration of imogolite by dry grinding. Clay Miner., 16 : 139-149.

HERBILLON A., TRAN VINH AN J. - 1964 - Etude de la fraction amorphe colloïdale de quelques sols tropicaux, Int. Sci. Sol, Bucarest, 1964, III, p. 1191-1201.

HETIER J.M. - 1968 - Etude de quelques sols andosoliques sur roches volcaniques primaires des Vosges. Thèse Sème cycle, Univ. Nancy, I, 54 p.

HETIER J.M. - 1970 - Etude de l'application du test FNa à l'estimation des constituants amorphes dans les sols tempérés. Sci. du Sol : 91-97.

HETIER J.M., 1971-73 - Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central. Sci. du sol, 1971, 2 : 51-82 ; 1973, 2 : 97-114.

HETIER J.M. - 1975 - Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Université Nancy, 194 p. multigr.

HETIER J.M., TARDY Y. - 1969 - Présence de vermiculite-AI, montmorillonite-AI, et leur répartition dans quelques sols des Vosges. C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D, 260 259-261.

HETIER J.M., JEANROY E. - 1973 - Solubilisation différentielle du fer, de la silice et de l'alumine par le réactif Oxalate-Dithionite. Pédologie, Gand, XXIII, 2 : 85-99.

HETIER J.M., GUTIERREZ-JEREZ F., BRUCKERT S. - 1974 - Morphoscopie et composition des complexes organo-minéraux des andosols. C.R. Acad. Sci., Paris, T. 278 : 2735-2737.

HETIER J.M.; YOSHINAGA N., WEBER F. - 1977 - Formation of clay minerais in ando soils under temperate climats. Clay Miner., 12 : 299-307.

HIGASHI T. - 1983 - Characterisation of Al/Fe-humus complexes in dystrandepts through comparison with synthetic forms. Geoderma, 31, p. 277-288.

HIGASHI T., IKEDA H. - 1974 - Dissolution of allophane by acid oxalate solution. Clay Sc!., 4 : 205-211.

HIGASHI T., WADA K. - 1977 - Size fractionation, dissolution analysis and infra-rad spectroscopy of humus -complexes in ando soils. J. Soil Sci., 28 : 653-663.

HINGSTON F.J., POSNER A.M., OUIRK J.P. - 1972 - Anion adsorption by goethite and gibbsite. 1/ Role of the proton in determinig adsorption envelopes. J. of Soil Sci. (23), P. 177-192.

HOFMANN V. von), REINGRABER R. - 1969 - Einlagerung verbindungen in wasserarmen halloys'tte. Z. anorgan. Allg. Chemie, 369 : 208-211.

HORIKAWA Y., FUJIO Y. - 1977 - State analysis of iron in allophanic clays. IMôssbauer affect analysis of iron in allophanic clays. Clay Sci., 5 : 67-77.

HOUNG K.H. - 1964 - A study on the soils containing amorphous materials in the Island of Hawaii, Thèse Univ. Hawaii, 187 p.

HOUNG K.H., UEHARA G., SHERMAN G.D. - 1966 - On the exchange properties of allophanic clays. Pacific Sci., 20, 4 : 507-514.

HSU P.H., BATES T.F. - 1964 - Formation of x-ray amorphous and crystalline aluminium hydroxydes. Min. Mag., 33, p. 749-768.

ICOMAND - 1979-1981 - International Committee on the classification of Andisols. Circular letters n° 1 (3 Ap. 1979), n° 2 (25 jan. 1980), n° 3 (30 Ap. 1980), n° 4 (9 sept. 1981), n° 9 (1 may 1987). M. Leamy, New Zeal. Soil Bureau.

IIMURA K. - 1960 - ion adsorption curves in allophane. Clay Sci. Jap., 1, 3-4 : 40-44.

IIMURA K. - 1960 - Acidic property and ion exchange in allophane. Clay Sci. Jap., I, 1-2 28-32.

IIMURA K. - 1966 - Acidic properties and cation exchange of allophane and volcanic ash soils. Bull. Nation. Inst. Agric. Sci., Tokyo B, 17 : 101-157 (Jap.) IIMARA K. - 1969 - The chemical bonding of atours in allophane. The ”structural formula” of allophane. C.R. Int. Clay Conf. Tokyo, : 161-172.

INGLES O.G., WILLOUGHBY D.R. - 1967 - An occurence of hisingerite with evidence of its genesis, Soil Sci., 104, 5 : 383-385.

INIGUEZ J., BARRAGAN E. - 1974 - Andosuelos desarrollados sobre filitas en Ulzama (Navarra). Anal. Edafol. Agrobiol., 33 : 1055-1069.

INOUE T., WADA K. - 1968 - Adsorption of humified clouer extracts by varions clays. 9th Congr. Soil Sci., III : 289-298.

IVANOVA EX, ROZOV N.N. - 1967 - Classification and determination of Soil Types. N° 1-5 (Translated from Russian, 1970 - Israël Progr. Sci. Transi. Jeresulem, 271 p.) IVANOVA E.N. et al. - 1960 - Present status of the doctrine of soit genesis in the USSR Soviet Soil Sci., 3 : 265-277.

JACKMANN R.H. - 1964 - Accumulation of organic matter in some New Zealand Soils under permanent pasture. New Zealand J. Agric. Res., 7, 4 : 445-479.

JACKMANN R.H. - 1966 - Organic malter, ploughing and the supply of available nutriants in pasture soils. N.Z. agric. Sci., I, 7 : 19-21.

JACKSON M.L. - 1965 - Free oxides, hydroxides and amorphous alumino-silicates. In : Methods of soil analysis.C.A. Black ed. Amer. Soc. Agron. Madison : 578-603 JACKSON M.L. - 1968 - Weathering of primary and secondary minerais in soils. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelâide, IV: 281-292.

JACKSON M.L., TYLER S.A., WILLES A.L. - 1948 - Weathering sequence of clay size minerais. J. Phys. Chem. 52 : 1237-1262.

JONES R.C., UEHARA G. - 1973 - Amorphous coatings on minerai surfaces. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38 : 792-798.

KALMS J.M. - 1970 - Etude des propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques. Recherches de corrélation entre la granulométrie, la densité apparente et les propriétés physiques. DEA de Pédologie, Montpellier, 37 p.

KANJI KAWAI - 1984 - Comparison of the differentiation criteria of andisols to those of Kuroboku soils (Japanese andosols). Congress internacional de suelos volcanicos. La Laguna, p. 357-367.

KANEHIRO Y., SHERMAN S.D. - 1956 - Effect of deshydratation-rehydratation on cation exchange capacity of Hawaüan Soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 20 : 341344.

KANNO I. - 1961 - Genesis and classification of humic allophane soit : in Japan. Int. Soc. Soil Sci. Cour. IV et V. Joint Meeting 1962. Palmerston North, New Zealand 422-427.

BIBLIOGRAPHIE 419 KANNO L, ARIMURA S. - 1967 - Dispersion of humic allophane soifs with supersonic vibration. Soif Sei. Plant Nutrit. Jap., 13, 6 : 165-178.

KANNO (. et al. - 1968 - Weathering and clay mineralogical characteristics of volranic ashes and pumices in Japan. Int. Congr. Soif Sci., 9, 1968, Adelâide, III 111-132.

KAWA) K. - 1969a - Changes in cation exchange capacity of some Andosols with dithionite-citrate treatment, Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 15, 3 : 97-103.

KAWAI K. - 1969b - Micromorphological studios of andosols in Japan. The Bull, of Nation. Inst. of Agric. Sci., (Japan), Série B, n° 20.

KAWAI K. - 1977 - Estimation of the amount of amorphous materials for characterizing andosols. Soif Sci. Soc. Amer. J., 41, 6 : 1171-1175.

KAWAI K. - 1978 - Amorphous materials of andosols (Kuroboku) in Japan. J.A.R.O., 12, 3 : 132-137.

KAWAI K. - 1980 - The relationship of phosphorus adsorption to amorphous Aluminium for characterizing Andosols. Soif Science, 129, 3 : 186-190.

KAWASAKI H., AOMINE S. - 1966 - So called 14 A clays minerais in some Andosols, Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 12, 4 : 144-150.

KIMPE (C.R. de), LAVERDIERE M.R. - 1982 - Dissolution of organo-metallic complexes and silica from the clay fraction of Podzolic Soifs. Comm. Soit Sci. Plant Anal., 13, 5 : 387-400.

KIRKMAN J.H. - 1977 - Possible structure of halloysite disks and cylinders observed in some New Zealand rhyolitic tephras. Clays minerais, 12, 3 : 199-216.

KIRKMAN J.H. - 1981 - Morphology and structure of halloysite in New-Zeland Tephras clays and minerais, vol. 39, n° 1, p. 1-9.

KIRKMAN J.H., Mc HARDY W.J. - 1980 - A comparative study of the morphology chemical composition and weathering of rhyolitic and andesitic glass. Clay Min., 15, p. 165-175.

KITAGAWA Y. - 1971 - The "unit particles" of allophane. Amer. Miner., 56, 3-4 : 465475.

KITAGAWA Y. - 1972 - Substitution of aluminium by iron in allophane. Clay Sci., 4, 151-154.

KITAGAWA Y. - 1973 - A short discussion of the chemical composition of allophane basal on the date of Yoshinaga in 1966. Soif Sci. Plant Nutrit., 19, 4 : 321-324.

KITAGAWA Y. - 1974 - Dehydrat'ron of allophane and ils structural formula. Amer. Minerai., 59 : 1094-1098.

KITAGAWA Y. - 1975 - Dehydration, micromorphology and chemical composition of allophane, Bull. Nat. Inst. Agri. Sci., n° 26, série B : 130-131.

KITAGAWA Y. - 1976-77 - Determination of allophane and amorphous inorganic malter in clay fraction of soifs. 1. Allophane and allophane-halloysite mixture. 2. Soif day fraction. Soif Sci. Plant. Nutrit. 22, n° 2 : 137-147 ; 23, n° 1 : 21-23.

KOBAYASHI S., SHOJI S., YAMADA L, MASUI J. - 1976 - Chemical and mineralogical studios on volcanic ashes. Soif Sci. PI. Nutr., 22, p. 7-13.

KOBO K., FUJISAWA T. - 1964 - Studios on the clay-humus complex - 4 Preferential adsorption of humic acid by clay. J. Sci. Soif Manure, Tokyo, 35 : 40-46 (J).

KOBO K., OBA Y., OISHI K. - 1974 - Genesis and characteristics of voicanic ash soils in Japan (part. 5) : the relation between the degree of weathering and parent material to minerai composition in clay fraction and dispersion of clay. J. Sci. Soli Manure, Japan, 45, p. 8-11.

KOHYAMA N., FUKUSHIMA K., FUKAMI A. - 1981 - Interlayer hydrates and complexes of clay minerais oberved by electron microscopy using and environmental cell. Int. Clay Conf., Bologna, 1981 : 373-384.

KUBOTA T. - 1972 - Aggregate formation of allophanic soils : Effect of drying on the dispersion of the soils. Soli Sci. Plant. Nutrit. (Tokyo), 18 : 79-87.

KUBOTA T. - 1973 - Studies on surface properties of soit particles and formation of soit structure. Soc. Soi. Soil Manure, Japan (ed.) Dojo Hiryo no Kenkyu, vol. 4, Yokendo, Tokyo : 37-45.

KURASHIMA K., SHOJI S., YAMADA 1. - 1981 - Mobilities and related factors of chemical elements in the top-soil of Andosols in Tohoku, Japan - I : Mobility sequence of major chemical elements. Soli Sci., 132, 4 : 300-307.

KYUMA K., KAWAGUGHI K. - 1964 - Oxidative changes of polyphenols as influenced by allophane. Soil Sc!. Soc. Am. Proc., 28 : 371-374.

KYUMA K., HUSSAIN A., KAWAGUCHI K. - 1969 - The nature of organic malter in soit organo-minerai complexes. Soli Sci. Plant. Nutrit., 15, 4 : 149-155.

LAI S.H., SWINDALE L.D. - 1969 - Chemical properties of allophana from Hawaüan and Japanese soils. Soli Sci. Soc. Am. Proc , 33 : 804-808.

LAMOUROUX M., QUANTIN P. - 1973 - Utilisation des courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de SEGALEN. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Xi, (: 3-14.

LATHAM M., DENIS B., et al - 1983 - Iles Fidji orientales. Etude du milieu naturel, de son utilisation et de son évolution sous l'influence humaine. Rapp. Génér. n° 3, Projet UNESCO, UNFPA - Ttrav.. Doc. ORSTOM n° 162, Paris, 184 p., 4 cartes h. t.

LEAMY M.L. - 1984 - Andisols of the world. Congreso internacional de suelos voicanicos. La Laguna, 1984, p. 369-387.

LEAMY M.L., SMITH G.D., COLMET-DAAGE F., OTOWA M. - 1980 - The morphological characteristics of andisols. Chap. 2, soils with variable charge, BKG. Theng (Ed.), N.Z. Soc. Soil Sci., p. 17-34.

LEON VALLEJO G., SEGALEN P. - 1970 - Observations sur des sols rouges dérivés de roches volcaniques basiques dans le Bajïo (Mexique Central). Can. ORSTOM, série Pédol., VIII, I : 49-61.

LEVIN L,, OTT E. - 1932 - X-rays study of opals, silica glass and silica gels. Z. Kristallogr., 81 : 305-318.

LIVEROVSKII, YU A. - 1971 - Volcanic ash soils of Kamchatka, Pochvovedanie, n° 6, p. 3-11.

LOGANATHAN P., SWINDALE L.D. - 1969 - The properties and genesis of four middle-altitude Dystrandepts volcanic ash soils from Maunea Kea, Hawâi. Pacific Soi., XXIII, 2 161-171.

LULLI L., BIDINI D. - 1978 - Guida escursione dibattito sui suoli dei vulcani Roccamonfina e Vulture. Centr. Genesi Classif. Cartogr. Suolo CNR, Univ. Firenze, Publ. n° 51. '

LULLI L., BIDINI D. - 1980 - A climosequence of soils from tuffs on slopes of an extinct volano in Southern Italy. Geoderma, 24, 2 : 129-142.

LULLI L., BIDINI D., DABIN B., QUANTIN P. - 1983 - Etude de deux sols andiques dérivés de roches

volcaniques, d'Italie du Sud (Mts Roccamontina et Vulture) à caractère crypto-podzolique. Cah. ORSTOM, série Pédol., XX, I : 27-61.

LUNA C. - 1969 - Genetic aspects of Colombian andosols, In panel on volcanic ash soils in Latin America, A.3. Inter-american Ins. Agr. Sci. Turrialba, Costa Rica.

MAC KEAGUE J.A., KODAMA H. - 1981 - Imogolite in cemented horizons of some British Columbia soils, Geoderma, 25 : 189-197.

MARIANO J.A. - 1965 - Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In world soit resources 14, FAONNESCO, p. 23-29.

MAEDA T., TAKENAKA H., WARKENTIN B.P. - 1977 - Physical properties of allophane soils. Advances in Agronomy, 29 : 229-264.

MARTINI J.A. - 1969 - Geographic distribution and properties of ash derived soils in Central America. Congrès Turrialba, Costa Rica A 3 : 1-12.

MARTINI J.A., PANLENCIA J.A. - 1975 - Soils derived from volcanic ash in Central America, I : Andepts. Soil Sc!., 120, 4 : 278.

MASUI J., SHOJI S., UCHIYAMA N. - 1966 - Clay minerai properties of volcanic ash soils in the northeastern part of Japan. Tohoku J. Agric. Res., 17 : 17-35.

MASUI J., SHOJI S. - 1969 - Crystalline clay minerais in volcanic ash soils in Japan. Proc. 3th Int. Clay Conf., I : 383-392.

MATSUI T. - 1969 - Clay mineralogy of the Volcanic Ash soils profiles on the southern foot of the Zao volcano, Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Ressources, Jap., 79, 25 : 22-31.

MATSUI T., TOTANI M. - 1963 - Studies on some functions of vermiculitic clays japanese soils. Clay Sc!. Jap., 1, 6 : 29-49.

MATSUSAKA Y., SHERMAN G.D. - 1961 - Magnetism of iron oxides Hawaüan soils. Soil Sci., 91 : 239-245.

MATSUSAKA Y., SHERMAN G.D., SWINDALE LD. - 1965 - Nature of magnetic minerai in Hawaüan Soils. Soils Sci., 100, 3 : 192-199.

MEHRA O.P., JACKSON M.L. - 1960 - Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Nat. Conf. on Clays and clay Miner., 7, 1958, Washington: 317-327.

MELIERES F., PERSON A. - 1978 - Genèse de smectites ferrifères par altération deutéritique de la base de coulées volcaniques du Massif Central français. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., (2), XX, fasc. 5 : 389-398.

METSON A.J., LEE R. - 1977 - Soil chemistry in relations to the New Zealand genetic soil classification. Soil Sci., 123, 6 : 347-352.

MILLOT G. - 1964 - Géologie des argiles, Masson Paris, 494 p.

Ministry of Agriculture and Forestry - Japanese Government - 1964 - Volcanic ash soils in Japan. Ministry of agriculture & forestry, Tokyo, 289 p. multigr.

MITCHELL D.D., FARMER V.C., Mc HARDY W.J. - 1964 - Amorphous inorganic materials in soils. Adv. in : Agron., 16 : 327-373.

MIYAUCHI N., AOMINE S. - 1964 - Does "Allophane B" exist in Japanese volcanic ash soils. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 10, 5 : 199-203.

MIYAUCHI N., AOMINE S. - 1966 - Effects of exchangeable cation on the high temperature exothermic peak

of allophane. Soil Soi. Plant. Nutrit. Jap., 12, I : 13-17.

MIZOTA C. - 1981 - Clay mineralogy of seven dystrandepts developed from basalts in Northland, the French Massif Central and Western Oregon. Soil Sci. PI. Nutr., 27, p. 511-522.

MIZOTA C. - 1976 - Relationships between the primary minerais and the clay minerai composition of some recent andosols. Soil Sci. Plant. Nut., 22, 3 : 257-268.

MIZOTA C., WADA K. - 1980 - Implications of clay mineralogy to the weathering and chemistry of Ap horizons of Ando soils in Japan. Geoderma, 23 : 49-63.

MIZOTA C., VAN REEUWIJK L.P. - 1987 - Chemistry and clay mineralogy of ”andisols” and related soils from diverse climatic regimes. International Soil reference and Information Centre. Monogr. 2, In press.

MOINEREAU J. - 1965 - Observations pédologiques sur les sols du Massif Volcanique des Coffrons. Bull. A.F.E.S., 6-7 : 188-223.

MOINEREAU J. - 1966 - Etude des sols et des paléosols du Bas-Vivarais. Thèse 3 ème cycle, Paris, 164 p.

MOINEREAU J. - 1974 - Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). Evolution de la fraction amorphe. Sci. du Sol, 4 : 253-267.

MOINEREAU J. - 1975 - Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns nature et évolution de la fraction argileuse. Sci. du sol, 4 : 295-313.

MOINEREAU J. - 1977 - Altération des matériaux basaltiques et genèse des argiles en climat tempéré humide et milieu organique. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., XV, 2 157-173.

MOINEREAU J. - 1977 - Adsorption de composés humiques par une montmorillonite H+, AI3+. Présence de smectites à couches interfoliaires organo-minérales dans les Andosols. Clay Miner., 12 : 75-82.

MOINEREAU J. - 1977 - Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay - Vivarais - Coffrons). Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 139 p.

MOINEREAU J., GRILLOT J.C., NAUD G. - 1972 - Origine et géochimie des niveaux rouges du plateau basaltique des Coffrons en Ardèche. Rev. Géog. Phys. Géol. Dyn., XIV, I : 85-94.

MOINEREAU J., BIBENT B., TRICHET J. - 1974 - Présence de produits amorphes et de minéraux argileux de la famille de l’halloysite dans les eaux de drainage d’un tuf basaltique. C.R. Acad. Sci. Paris, T. 278, +6 mai 1974, Sér. D : 2389-2392.

MONACO A., VALETTE J.N. - 1978 - Etude des produits d’altération fumerollienne et météorique à Vulcano (lies Eoliennes, Italie). Clays Minerais, 13,1: 79-91.

MULJADI D. - 1972 - Structural problems of Indonesian soils. Medelungen van de Facufteit Landbowwenten-schappes. Rijksuniversiteit, Gent, 37, 3 : 1062-1065.

MUMBRUN L.E. de, CHESTERS G. - 1964 - Isolation and characterization of some soils allophanes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28, 3 : 355-359.

MUNEVAR F., WOLLUM A.G. - 1977 - Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on carton and nitrogen mineralization in andepts from Colombia. Soil Sc. Soc. Am. J. (41), p. 540-545.

NAKAI M., YOSHINAGA N. - 1976 - A device in the determination of Si in dithionitecitrate-bicarbonate extract. Soif Sci. Plant. Nutr., 22, 4 : 481-483.

NAKAI M., YOSHINAGA N. - 1980 - Fibrous goethite in some soils from Japan and Scotland. Geoderma, 24 :

143-158.

NAVROT J., SINGER A. - 1976 - Geochemical changes accompanying basic igneous rocks clays transition in a humid mediterranean climate. Soil Sci., 121, 6 337-345.

NEALL V.E. - 1977 - Genesis and weathering of andosols in Taranaki, New Zealand. Soil Sci., 123 (6) : 400-408.

NEW ZEAIAND, Department of Scientific and Industrial Research - 1968 - Soils of New Zealand, Part. I, chap. 3. Regional description of New Zealand Soils. Part. 2, chap. 6. Mineralogy of New Zealand Soils. Part. 3, chap. 11, description and analyses of reference soils. Soil Bureau Bull. n° 26.

NORTHEY R.D. - 1966 - Correlation of engineering and pedological soil classification in New Zealand. New Zealand J. Sci., 9, 4 : 809-832.

OBO Y., KOBO K. - 1965 - I° Agregates in fine sand fraction of volcanic ash soils by sonic treatmeM. J. Sci. Soil Manure, Tokyo, 36 : 203-210 (en Jap.).

OHMASA M. - 1964 - Scope of volcanic ash soils. In FAO Meet., 1964 : 7-8.

OKAJIMA H. - 1977 - Reclamation and improvement of soils derived from volcanic ash. In Soils der'rved from volcanic ash in Japan, by YOSHIAKI ISHIZUKA and C.S. BLACK, CIMMY, Mexico. Chap. 3 : 65-84.

ONIKURA Y. - 1964 - Factors relating to labile phosphate levels in volcanic ash soils. Soil Sc!. Plant. Nutrit. Jap., 10 : 20-27.

PALMONARI C. - 1966 - Etude d'un matériau d'altération de roche pyroclastique. Bull. Soc. f r. Ceram., 70 : 3-9.

PARFITT R.L. - 1972 - Amorphous material in some Papua New Guinea soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, 4 : 683-686.

PARFITT R.L. - 1978 - Anion adsorption by soils and soit material. Adv. in Agron. (30), p. 1-50.

PARFITT R.L. - 1980 - Chemical properties of variable charge soils : in Soils with variable charge, Ed. Theng, 1980 : 167-194.

PARFITT R.L., MAVO B. - 1975 - Phosphate fixation in some Papua New Guinea soils. Science in New Guinea, 3, p. 179-190.

PARFITT R.L., FRASER A.R., RUSSELL J.D., FARMER V.C. - 1977 - Adsorption on hydrous oxydes. II - Oxalate, benzoate and phosphate on gibbsite. J. of Soil Sc., (28). p. 40-47.

PARFITT R.L., FRASER A.R., FRAMER V.C. - 1977 - Adsorption on hydrous oxydes. III - FuNic and humid acide on goethite, gibbsite and imogolite. J. of Soil Sc., (28), P. 289-296.

PÂRFITT R.L., HENMI T. - 1980 - Structure of some allophane from New Zealand. Clays and clay Miner., G.B.R., 28, 4 : 285-294.

PÂRFITT R.L., FURHERT R.J. - 1980 - Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra. Clays and clay minerais, vol. 28, n° 5, p. 328-334.

PARFITT R.L., HENMI T. - 1982 - Comparison of an oxalate - extraction method and an infra-red spectroscopic method for determining allophane in soils clays. Soli Sci. Plant. Nutr., 28,2 : 183-190.

PARFITT R.L., WEBB T. - 1983 - Allophane in some South Island yellow-brown shallow and stony soils and in high country and upland yellow-brown earthes. N.Z. J. Sci.

PARFITT R.L. - 1984 - The nature of andic and vitric materials. Congreso internacional de suelos volcanicos.

La Laguna, p. 413-435.

PARFIIT R.L., RUSSEL M., ORBELL G.E. - 1983 - Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zelan. Goederma, 29, p. 41-57.

PARFITT R.L., WILSON C.W. - 1985 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils. Catena suppl. 7, p. 1-8.

PARFITT R.L., CHILDS C.W. - 1988 - Estimation of forms of Fe and A1 : a review and analysis of contrasting soils using dissolution and Moessbauer methods. Aust. J. Soli Res., 26 (1), In press.

PÂRFITT R.L., CHILDS C.W., EDEN D.N. - 1988 - Ferrihydrite and allophane in four andepts from Hawaii and implications for their classification. GEODERMA (41), 1988, p. 223-241.

PARK R.G. - 1969 - The electrophoretic separation of mixtures of pure clays and the electrophoretic separation and characterization of a soit allophane. Thèse Univ. Idaho (U.S.A.).

PATERSON E. - 1977 - Specific surface area and pore structure of allophanic Soli clays. Clay Miner., 12, I : 1-19.

PECROT A., GASTUCHE M.G., DELVIGNE J., VIELVOYE L., FRIPIAT J.J. - 1962 L'altération des roches et la formation des sols aux Kivu (Rép. du Congo) INEAC. Publ. sér. Sci., n° 97? Bruxelles, 92 p.

PEDRO G. - 1968 - Note sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy de la Vache (Massif Central) ; Conséquences géochimiques. Bull. A.F.E.S., 3 : 17-20.

PEDRO G. - 1983 - Les constituants amorphes des sols. Eléments d'introduction. Sciences du sol (3-4), p. 137-152.

PEDRO G., LUBIN J.C. - 1968 - Etude sur l'évolution géochimique des gels aluminosiliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en condition de libre drainage. Ann. Agron., 19, 3 : 293-347.

PEDRO G., MELFI A.J. - 1970 - Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silico-ferriques amorphes en milieu lessivé. Pédol., XX, I : 5-33.

PERROTT K.W. - 1978 - The influence of organic malter extracted from humified clouer on the properties of amorphous alumino-silicates. Part. I, Surface charge. Part. II, Phosphate retention. Austral. J. Soli Res. 16 : 327-339 et 341-346.

PERROTT K.W. - 1981 - Effects of pH and alumino-silicate composition on K-Mg exchange selectivity of amorphous alumino-silicates. Geoderma, 26 : 311-322.

PETTAPIECE W.W., PAWLUCK S. - 1972 - Clay mineralogy of soils developed partially from volcanic ash. Procesd. Soil Sci. Soc. Amer., 36 : 515-519.

PYMAN M.A.F., KNUIMAN M.K., et al. - 1979 - Examination of the heterogeneity of amorphous silico-aluminas and allophanes using the electron micro-probe. J. Soil Sci., 30 : 333-345.

QUANTIN P. - 1972 - Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'Archipel des Nouvelles-Hébrides. Cah. ORSTOM, série Pédol., 10, 2 : 123-151 et 3 : 207-2170.

QUANTIN P. - 1972 - Les Andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. Cah. ORSTOM, série Pédol., Vol. X, 3 : 273-302.

QUANTIN P. - 1973 - Andosols saturés sur cendres basaltiques des NouvellesHébrides. Bull. liaison Thème Andosols, n° 2 : 78-104. Rapp. ORSTOM, Paris, mulciga.

QUANTIN P. - 1974 - Hypothèse sur la genèse des andosols en climat tropical. Evolution de la "pédogénèse initiale" en milieu bien drainé sur roches volcaniques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XII, I : 3-12.

QUANTIN P. - 1974 - Genèse et évolution des substances minérales amorphes et cristallisées dans les andosols des Nouvelles-Hébrides. Transact 10 th Internat. Cong. Soil Sci., Moscou, vol. VII : 37-43.

QUANTIN P. - 1975 - Problème de la détermination des substances minérales amorphes. Communication Semaine Pédologique de l'ORSTOM (22-26 Septembre 1975) ; résumé 5 p. muftigr., Centre ORSTOM Bondy.

QUANTIN P. - 1975 - Observations sur les sols de Ténérife, Lanzarote, et la Palma. Rapport multigr. ORSTOM Services Scientifiques Centraux, Bondy.

QUANTIN P. - 1972-79 - Atlas de l'Archipel des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Sols et quelques données du milieu naturel. Cartes de Pédologie, géologie, formes de relief, végétation et utilisation des sols, 18 planches en couleur. Notice explicative de 255 p., 34 x 46 cm, en 7 fascicules : Valté ; Epi-Shepherd ; Ambrym - Aoba -Maewo - Pentecôte ; Espir'rtu-Santo ; Malikolo ; Banks-Torrès ; Erromango - Tanna Anatom. ORSTOM, Paris.

QUANTIN P. - 1982 - Proposition du taux de Capacité d'Echange de Cations dépendante du pH, comme critère de classification des andosols des NouvellesHébrides (Vanuatu). Cah. ORSTOM sér. Pédol., XIX, 4 : 369-380.

QUANTIN P. -1982 - Caractérisation des constituants minéraux amorphes et cryptoaistallins d'andosols (méthodologie, application et extension à d'autres sols). Comm. orale à l'Ass. Fr. Etude des Sols, 16 décembre 1982, Paris, à paraître en 1983 dans Science du Sol.

QUANTIN P. - 1982 - Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogénèse initiale en milieu tropical. Mémoire de thèse, en cours de rédaction.

QUANTIN P. - 1982 - Carte des potentialités agronomiques et des aptitudes culturales du Vanuatu (Nouvelles-Hébrides). Notice explicative français-anglais. Planches en couleur à 1/500.OOOe (2 feuilles) et à 1/100.OOOe (5 feuilles). ORSTOM, Paris, 2 x 49 p.

QUANTIN P. - 1984 - Characteristics of the Vanuatu andosols. Congreso Internacional de Suelos volcanicos. La Laguna, p. 449-460.

QUANTIN P. - 1990 - Référentiel Pédologique Français. Sème proposition. Avril 1990 : les andisols (sols "andiquesj. AFES-INRA, p. 71-81.

QUANTIN P. - 1991 - Les sols de l'Archipel des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogénèse initiale en milieu tropicale. Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 460 p.

QUANTIN P., LAMOUROUX M. - 1974 - Adaptation de la méthode cinétique de SEGALEN à la détermination des constituants minéraux de sols variés. Cah. ORSTOM, sér. Pédol.; XII, I : 13-46.

QUANTIN P., FERNANDEZ-CALDAS E., et al. - 1975 - Problème du rajeunissement des sols issus de l'altération de roches volcaniques, par des éruptions récentes de cendres volcaniques, aux Nouvelles Hébrides et aux lies Canaries. Bull. Assoc. Géogr. Franç., n° 426 : 211-217.

QUANTIN P., BOULEAU A. - 1983 - Détermination des constituants minéraux amorphes et cryptocristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par MCI et NaOH. Sc. du Sol, Bull. AFES, n° 3-4, 1983, p. 217-234.

QUANTIN P., JANOT Ch. - 1975 - Evolution de la localisation du fer dans les sols volcaniques des Nouvelles-Hébrides. Comm. orale, 11 ème Congr. Ass. Int. Sci. sol, Ecmonton (Canada), Abstr. vol. I : 179.

QUANTIN P., BADAUT-TRAUTH D. et WEBER F. - 1975 - Mise en évidence de minéraux secondaires, argiles et hydroxydes dans les andosols des NouvellesHébrides, après déferrification par la méthode de ENDREDY. Bull. Gr. Fr. Argiles, XXVII, I : 51-87.

QUANTIN P., FERNANDEZ-CALDAS E., TEJEDOR-SALGUERO M.L. - 1977 Climatoséquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries) 1 ère partie Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. Cah. ORSTOM, série Pédol., XV, 4 : 391-407.

QUANTIN P., TEJEDOR-SALGUERO M.L., FERNANDEZ-CALDAS E. - 1978 Observations sur la présence de sols ferrallitiques dérivés de matériaux volcaniques aux lies Canaries. Cah. ORSTOM série Pédol., XVI, 2 : 155-175.

QUANTIN P., FERNANDEZ-CALDAS E., TEJEDOR-SALGUERO M.L. - 1978 Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). Cah. ORSTOM sér. Pédol. 1 ère partie, vol. XVI, n° 3 : 251-264 ; 2 ème partie, vol. XVI, n° 4 : 397-412.

QUANTIN P., DABIN A., BOULEAU A., LULLI L., BIDINI L. - 1985 - Characteristics and genesis of two andosols in Central Italy. Catena supplément 7 : volcanic soils, 1985, p. 107-117.

RADCLIFFE D.J. - 1983 - The management properties of andisols in Southern Highlands Province, PNG, AFTSEMU Tech. rep. n° 12.

RADCLIFFE D.J., GILLMAN G.P. - 1984 - Surface charge characteristics of volcanic ash soils from the Southern highlands of Papua New Guinea. Congreso international de suelos volcanicos, La Laguna, 1984, p. 164-192.

RECEL M.R. - 1980 - Reclassification of andepts of the state of Hawaiien the proposed order andisols. M.S. thesis, Univ. of Hawaii.

RICHE G., SEGALEN P. - 1969 - La zonalité verticale en Ethiopie du Centre et du Sud-Est. Bull. Bibliogr. Pédol., XVIII, fasc. 2 : 5-10.

RICO M. - 1965 - Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In world soit Resources Report 14, FAO/UNESCO, p. 23-29.

ROSS C.S., KERR P.F. - 1930 - The kaolin minerais. Geol. Surv. prof. Paper, USA, 165-6 151-180.

BOSS C.S., KERR P.F. - 1934 - Halloysite and allophane. Geol. Surv. prof. Paper, USA, 185 : 135-148.

ROSS G.J., KODAMA H. - 1979 - Evidence for imogolite in Canadian soils. Clays CI. Miner., 27, 4 : 297-300.

ROSELLO V. - 1982 - Compte-rendu de recherches bibliographiques concernant l'aRération de matériaux volcaniques, ainsi que la formation et les propriétés des sols qui en dérivent. Rapp. muftigr., Labo. Pédologie, Univ. Paris 7, 85 p.

ROUILLER J., BURTIN G., SOUCHIER B. - 1972 - La dispersion des sols dans l'analyse granulométrique. Méthode utilisant les résines échangeuses d'ions. Bull. ENSALA, XIV, 2 : 193-205.

RUSSEL J.D., Me HARDY W.J., FRAZER A.R. - 1969 - Imogolite : a unique aluminosilicate, Clay Miner., 8 : 87-99.

RUSSEL M., PARFITT R.L., CLARIDGE G.C.C. - 1981 - Estimation of the amount of allophane and other materials in the clay fraction of an Egmont-Loam profile and other volcanic ash soils, New Zealand. Austral. J. Soil. Res. 19 : 185-195.

RUTHERFORD G.K. - 1962 - The Yellow Brown Soils of the Highlands of New Guinea. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 434-439.

RUTHERFORD G.K., DEBENHAM P.L. - 1981 - The mineralogy of some silt and clay fractions from soils on the Faerce Islands. Soil Sci., 132, 4 : 288-299.

RUXTON B.P. - 1968 - Rates of Weathering of Quaternary volcanic ash in NorthEast Papua. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelâide, vol. IV: 367-376.

SAITO M., KAWAGUCHI K. - 1971 - Flocculating tendancy of paddy soils. II Soils derived from volcanic ash and significance of aggregates in paddy soils. J. Sci. Soil Manure (Jap. ed.), 42, 2 : 58-60.

SCHAEFFER R., ALCAYAGA U. de., SAN MARTIN E. - 1969 - Microbial activities as a mechanism of ecosystem regulation in the hydromorphic volcanic ash soils of Southern Chile. In Turrialba, Costa Rica, B.6 : 1-15.

SCHAEFFER R., BENLOT C. - 1978 - Les sols à allophane dérivés de cendres volcaniques. Relations entre le caractère des activités microbiennes et les conditions de climat. C.R. 103 ème Cong. Nat. Soc. Nancy, Fasc. II : 16 p.

SCHWERTMANN U., FISCHER W.R., PAPENDORF H. - 1968 - The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelâide, vol. I : 645-655.

SCHWERTMANN U., et al. - 1978 - The influence of AI on Fe oxide formation. Part. II. Clays CI. Miner. 26, 6 : 273-283.

SCHWERTMANN U. - 1978 - Non crystalline and accessory minerais. Int. Clay Conf. 1978, Oxford : 491-499 in, MORTLAND, FARMER Ed, Developments in Sedimentology n° 27, Elsevier Publ.

SEGALEN P. - 1957 - Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. Thèse Mém. Inst. Sc! Madagascar, D VIII: 1-181.

SEGALEN P. - 1967 - Les sols de la vallée du Noun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., V, 3 : 287-349.

SEGALEN P. - 1968 - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, n° 1 : t05-126.

SEGALEN P. - 1973 - Quelques progrès récents dans la connaissance des produits amorphes des sols. Bull. de liaison du thème D "Andosols". Comité Technique de Pédologie, ORSTOM, n° 2, Mars 1973.

SHERMAN G.D., KANEHIRO Y., MATSUSAKA Y. - 1953 - The vole of dehydratation in the development of laterites. Pacif. Sci., 7, 438 p.

SHERMAN G.D., MATSUSAKA Y., IKAWA H., UEHARA G. - 1964 - The vole of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils. Agrochimica Ital., 8, 2 :148162.

SHOJI S., MASUI J. - 1969 - Amorphous clay minerais of recent volcanic ash soils in Hokkaido. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 15, 4 : 161-168 et n° 191-201.

SHOJI S., ONO T. - 1978 - Physical and chemical properties and clay mineralogy of andosols from Kitakami, Japan. Soil Sci., 126, 5 : 297-312.

SHOJI S., SAIGUSA M. - 1977 - Amorphous clay materials of Towada andosoils. Soil Sci. Plant. Nutr., 23, 4 : 437-455.

SHOJI S., SAIGUSA M. - 1978 - Occurence of laminar opaline silica in some Oregon Andosols. Soil Sci. Plant. Nutr., 24 : 157-160.

SHOJI S., SAIGUSA M., TAKA HASHI T. - 1980 - Plant roof growth in acid andosols from northeastern Japan. I. Soil properties and roof growth of burdock, barley and orchard grass. Soil Sci., 130, p. 124-131.

SHOJI S., FUJIWARA Y. - 1984 - Active AI and Fe in the humus horizons of andosols from North Eastern Japan : their forms, properties and significance in clay weathering. Soil Sci.

SIEFFERMANN G. - 1969 - Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Sci. Nat. Univ. Strasbourg, 285 p. multigr. Mémoire ORSTOM n° 66, 1973, 183 p.

SIEFFERMANN G. - 1973 - Les facteurs de formation des produits amorphes silicoalumineux. Le rôle de la matière organique dans leur maintien. Bull. de liaison du thème D "Andosols" ; Comité Technique de Pédologie, ORSTOM, n° 2, Mars 1973.

SIEFFERMANN G., JEHL G., MILLOT G. - 1968 - Allophanes et minéraux argileux des altérations récentes des basaltes du Mt Cameroun. Bull. Gr. fr. Argiles, XX 109-129.

SIEFFERMANN G., MILLOT G. - 1968 - L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. Bull. Gr. fr. Argiles. XX : 25-38.

SIEFFERMANN G., MILLOT G. - 1969 - Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroun. Allophanes, halloysite, metahalloysite, kaolinite and gibbsite. Int. Clay Conf., 1969, Tokyo, I : 417-430.

SIFFERT B. - 1962 - Quelques réactions de la silice en solution. La formation des argiles. Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. n° 21, Strasbourg.

SIFFERT B. et WEY R. - 1961 - Sur la synthèse de la kaolinite à la température ordinaire. C.R. Acad. Sci. Paris, 254 : 1460-1463.

SIMONSON R.W. - 1979 - Origine of the narre "ando soils", GEODERMA, 22 (1979), p. 333-335.

SIMONSON R.W., RIEGERS S. - 1967 - Soils on the Andepts suborder in Alaska. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 31, 5 : 692-699.

SINGER A. - 1970 - Weathering products of basait in the Galilee. Israël J. Chem., 8, 3 : 459-468.

SINGER A., NAVROT J. - 1977 - Clay formation from basic volcanic rocks in a humid mediterranean climats. Soif Sci. Am. J., 41, 3 : 645-650.

SINGH B.R., KANEHIRO Y. - 1969 - Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic Hawaüan soifs. Soif Sci. Soc. Am; Proc., 33 : 631-683.

SMALLEY LJ., ROSS C.W., WHITTON J.S. - 1980 - Clays from New Zealand support the inactive particle theory of soit sensitivity. Nature, 288 : 576-577.

SMITH G. - 1978 - A preliminary proposai for reclassification of Andepts and some andic subgroups. New Zealand Soil Bureau, 20 p. multigr.

SMITH G. - 1984 - The andisol proposai, 1978. New Zeland Soil Bureau Record 96, D.S.LR., New Zeland.

SNETSINGER SK.G. - 1967 - High-alumina-allophane as a weathering product of plagioclase. Amer. Mineralogist., 52, n° 1-2 : 254-262.

SOKOLOV LA. - 1969 - Weathering of volcano-clastic deposits in conditions of coldhumid climats. 3th Int. Work. Meet. Soif Micromorphology, Wroclaw, p. 513-518.

SOKOLOV LA. - 1972 - Recent soif formation on Kamtchatka, in the zone of light ash falls. Transi. Pochvovedeniye, 1972, 10 : 13-25.

SOKOLOV LA. - 1973 - Volcanisme et pédogénèse ; sur l'exemple des sols du Kamtchatka. Izd. Nauka, Moscou, 1973, traduction ORSTOM, Bondy. (M. KOBYLANSKY).

SOKOLOV LA., BELOUSOVA N.I. - 1964 - Organic malter in Kamtchatka soifs and some aspects of illuvial humus formation. Pochvovedeniye, 10 :1026-1035.

SOKOLOV LA., BELOUSOVA N.I. - 1966 - Water physical properties and water thermal regime of ochrous volcanic soifs of Kamtchatka. Pochvovedeniye, 5 : 533543.

SOKOLOV LA., TARGUL'YAN V.O. - 1962 - Characteristics of soit formation in Kamtchatka in relation to recent volcanic activity. Summ. papers confer. Siberian Soi] Sci. Gorno-Altaysk 1962.

STROMEYER F., HAUSMANN J.F.L. - 1816 - Allophan von Grâfentahl. Gëtt. Geol. Anz., 2, 125, Gilb. Ann., 54, 120 p.

SUDO T., NAKAMURA T.- 1952 - Hisingerite from Japan. Amer. Mineralogist, 37 618-621.

SUDO T., TAKANASI M. - 1955 - Shapes of halloysite particles in Japanese clays. Ne. Conf. on Clays and clay Miner., 4, 1955, Pennsylvania : 67-69.

SUDO T. et SHIMODA S. - 1978 - Clays and clay minerais of Japan. Development in sedimentology n° 26, 326 p., Elsevier Publ. Amsterdam.

SUNG-HO-LAI, SWINDALE L.D. - 1969 - Chemical properties of allophane from Hawaüan and Japanese Soifs. Soif Sci. Soc. Amer. Proc., 33 : 804-808.

SUZUKI S., SATOH T. - 1980 - Effect of iron on the exothermic peak temperature of allophane from a Misotsuchi weathered pumice bed. Soif Sci. Plant. Nutr., 26,3 : 441445.

SWINDALE L.D., SHERMAN G.D. - 1964 - Hawaüan soifs from volcanic ash. FAO, W.R. Rep., 14 : 36-49.

TAIT J.M., YOSHINAGA N., et MITCHELL B.D. - 1978 - The occurence of imogolite in some Scottish soils. Soil Sci. Plant. Nutr., 24 : 145-151.

TAMINI T.M., KANEHIRO Y., SHERMAN G.D. - 1963 - Ammonium fixation in amorphous Hawaüan soils. Soil Sci., 95 : 426-430.

TAMINI Y.N., KANEHIRO Y., SHERMAN G.D. - 1964 - Reactions of the ammonium phosphate with gibbsite and with montmorillonite and kaolinite soils. Soil Sci., 98, 4 249-255.

TAN K.H. - 1965 - The andosols in Indonesia. Soil Sci., 99 : 375-378.

TAN K.H. - 1966 - On the pedogenetic rote of organic malter in volcanic ash soils undertropical conditions. Soil Sci. Plant. Nutr. Jap., 12, 2 : 80-84.

TAN K.H. - 1969 - Chemical and thermal characteristics of allophane in Andosols of the tropics. Soil Sc!. Soc. Amer. Proc., 33 : 469-472.

TAN K.H., PERRINS H.F., Mc CREERY R.A. - 1975 - Amorphous and crystalline clays in volcanic ash soils of Indonesia and Costa Rica. Soil Sci., 119, 6 : 431-440.

TAZAKI K. - 1971 - Imogolite in the Daisen loam and Sanbesan loam. Geol. Soc. Japan, j. 77, p. 407-414.

TAZAKI K. - 1978 - Micromorphology of halloysite produced by weathering of plagioclase in volcanic ash. Int. Clay Conf., Oxford, 1978 : 415-422. Ed. MORTLAND, FARMER ; Development in Sedimentology n° 27, Elsevier Publ.

TAZAKI K. - 1979 - Micromorphology of halloysite produced by weathering of plagioclasc in volcanic ash. Int. Clay Conf., Elsevier, Amsterdam, p. 415-422.

TAZAKI K. - 1981 - Analytical electron microscopic studies of halloysite formation processes morphology and composition of halloysite. Int. Clay Conf., Bologna, 1981: 573-584.

TEJEDOR SALGUERO M.L., FERNANDEZ CALDAS E., QUANTIN P. - 1978 Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (lies Canaries). 1 ère partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. Cah. ORSTOM, série Pédol., XVI, 3 : 251-264.

TEJEDOR SALGUERO M.L., QUANTIN P., FERNANDEZ CALDAS E. - 1978 Climatoséquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries). 2ème partie : Caractéristiques minéralogiques, interprétation et classification. Cah. ORSTOM, série Pédol., XVI, I : 83-106.

TEJEDOR SALGUERO M.L., QUANTIN P., FERNANDEZ CALDAS E. - 1979 Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (lies Canaries). 2 ème partie : Caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques. Cah. ORSTOM série Pédol., XVII, 2 : 119-127.

TEJEDOR SALGUERO M.L., QUANTIN P., FERNANDEZ CALDAS E. - 1979 Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 3 ème partie : typologie, pédogénèse et classification. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XVII, 3 : 185-193.

TERCINIER G. - 1969 - Modifications apportées par la préparation conventionnelle des échantillons de terre à leurs propriétés physiques et hydriques. Cah. ORSTOM, série Pédol., VII, 4 : 585-601.

TERCINIER G., QUANTIN P. - 1968 - Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles-Hébrides. Cah. ORSTOM, série Pédol., VI, 2 : 203-224.

THENG B.K.G. - 1979 - Formation and properties of clay-Polymer complexes. Devebpment in Soil Science n° 9. Elsevier Publis. Co, Amsterdam, 362 p.

THENG B.K.G., RUSSEL M., CHURCHMANN J. PARFITT R.L. - 1982 - Surface properties of allophane, halloysite, and imogolite. Clays and clay Miner., 30, 2 : 143149.

THENG B.K.G., et al. - 1980 - Soils with variable charge. Soil bureau, Dept.Scr Industr. Res., New Zealand, 448 p.

THORP J. et SMITH G. - 1949 - Higher categories of soit classification. Soil Sci., 67 117-126.

TOKASHIKI Y. - 1974 - Mineralogical analysis of volcanic ash soil and clays by selective dissolution method. Ph. D. Thesis, Kyushu, University, Fuhuohan Japan.

TOKASHIKI Y., WADA K. - 1972 - Determination of silicon, aluminium and iron dissolved by successive and selective dissolution treatments of volcanic ash soit clays. Clay Sci., 4 :105-114.

TOKASHIKI Y., WADA K. - 1975 - Weathering implication of clay fractions of two andosols, Kyushu. Geoderma, 14 : 47-62.

TOKUDOME S., KANNO I. - 1965 - Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Part I : Humic acids (Chy Fulvic acids (CE) ratio. Soil Sc!. Plant. Nutrit. Jap., 11, 5 : 185-192.

TOKUDOME S., KANNO I. - 1968 - Nature of the humus of some japanese soils. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelâide, III : 163-173.

TRICHET J. - 1970 - Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verrres volcaniques ; Thèse Sci. Nat., Paris, Ecole Normale Supérieure, Travaux du laboratoire de Géologie, 4, Paris, 153 p.

TRICHET J., SELLA C. - 1968 - Etude de la structure des verres volcaniques. Relation avec leur mode de formation et d'altération. C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D, t. 267 : 1084-1087.

TRICHET J., SVORONOS D.R. - 1968 - Etude des premiers stades d'altération d'un verre volcanique. C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D, t. 266 : 1207-1209.

TUNCER E.R., LOHNES R.A., DEMIREL T. - 1977 - Dessication of soils derived from volcanic ash. Nat. Acad. of Sci. Washington D.C., Trasportation research record, n° 642, p. 44-49.

UCHIYAMA N., MASUI J., ONIKARA Y. - 1962 - Montmorillonite in a volcanic ash soit. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 8, 1 : 13-19.

UCHIYAMA N., MASUI J., SHOJI S. - 1968 - Crystalline clays minerais of the soils derived from recent volcanic ashes in Hokkaido, Japan. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 14, 4 125-140.

UDAGAWA S., NAKADA T., NAHIIRA M. - 1969 - Molecular structure of allophane as revealed by'tts thermal transformation. C.R. Int. Clay Conf. Tokyo : 151-159.

UEHARA G., IKAWA H., SHERMAN G.D. - 1966 - Desilication of halloysite and its relation to gibbsite

formation. Pacific S>CL, 20,1: 119-124.

U.S.D.A. - 1972 - Soil Survey of Islands of Kauai, Oahu, Maui, Molokai, and Lanai, State of Hawaii, 232 p. et carte à 1 /253.440.

U.S.D.A., Hawaii University - 1973 - Soil survey of Island of Hawaii, (State of Hawaii). Hawaii AGRIC. Exper. Stat. dec. 1973, 115 p., 195 maps.

U.S.D.A. - 1975 - Soil Taxonomy. A basic system of Soil Classification for making and interpreting soit surveys. U.S.D.A. Soil Conservation Service. Agric. and-book n° 436, 754 p.

VALDES A. - 1969 - Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Peru. In : "panel on volcanic ash soils in Latin America". Inter-American Inst. Agr. Sc. Turrialba, Costa Rica.

VAN DER GAAST J.J., MIZOTA C., JANSEN J.H.F. - 1986 - Curved smectite in soils from volcanic ash in Kenya and Tanzania : a low-angle X-ray powder diffraction study. Clays clay miner., 34, p. 665-671.

VANDICKELEN R., DE ROY G., VANSANT E.F. - 1980 - New Zealand allophanes a structural study. J.C.S. Faraday, I, 76 : 2542-2551.

VEHARA G., GILLMAN G.P. - 1981 - The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado, 1981, 170 p.

VIEILLEFON J., BOURGEAT F. - 1965 - Notice explicative ; cartes pédologiques de reconnaissance à 1/200.OOOe ; feuille d'Ambilobe - ORSTOM, notice n° 22, Paris, 92 p., I carta.

VILLIERS J.M. de - 1970 - The problem of quantitative determination of allophane in soit. Soil Sci., 112, I : 2-7.

VIOLANTE P. - 1978 - Considerazioni generali sulla genesi dalle argile nei suoli vulcanici in LULLI et BIDINI, 1978.

VIOLANTE P., et VIOLANTE A. - 1973 - Gli andosuoli dal Vulture. Ann. Fac. Sc!. Agr. Univ. Studio Napoli, Portici, ser. IV, 7 : 3-22.

VIOLANTE P. et TAIT J.M. - 1979 - Identification of imogolite in some volcanic soils from Italy. Clay Minerais, 14, 2 : 155-158.

VIOLANTE A., JACKSON M.L. - 1981 - Clay influence on the crystallization of Aluminium hydroxide polymorphs in the presence of citrate, sulfate or chloride. Geoderma, 25 ; 199-214.

VIZCAYNO-MUNOZ C., GARCIA-VICENTE J., GARCIA-GONZALEZ M.T. - 1978-79 - Suelos volcanicos espanoles. 6 parties in Anales de Edafologia y Agrobiologia : 1978 ; Part. I, p. 1017 ; part. II, p. 1035. - 1979 ; Part. III, p. 7 ; part. IV p. 23. - 1979 ; n° 3-4, p. 413-429 ; part. V, Campo de Calatrava (Cuidad Real) ; caracteristicas morrologicas y quimicas ; p. 431-445 ; part. VI, idem, mineralogia de la fraction arcilla.

VOSS R.L. - 1969 - The characteristics and genesis of the Akaka and Hilo Soils of Island of Hawaii. Thèse Soil Sci., Univ. Hawaii, Honolulu, VII, 94 p.

WADA K.- 1959 - Reaction of phosphate with allophane and halloysite. Soil Sci., 87 325-330.

WADA K. - 1966 - Deuterium exchange of hydroxyl groupe in allophane. Soil Sci. . Plant Nutrit. Jap., 12, 5 : 176-182.

WADA K. - 1967 - A structural schema of soit allophane. Amer. Mineralogist, 52 690-708.

WADA K. - 1977 - Allophane and Imogolite. In Minerais in Soil Environments, edited by DIXON J.B., WEED S.G., 1977. Soil Sci. Soc. of Amer., Madison, Wisconsin, USA: 603-638.

WADA K. - 1978 - Allophane and imogolite ; in Clays and clay minerais of Japan, Ed. Sudo, Shimoda, 1978 : 147-187.

WADA K. - 1979 - Structural formula of allophanes. Intern. Clay Confer., Oxford, 1978, in Develop. in sedimentology, n° 27, Elsevier Sci. Publish. Co, 1979 : 537545.

WADA K. - 1980 - Mineralogical characteristics of Andisols ; in soils with variable charge, Ed. Thang, 1980 : 87-107.

WADA K. - 1981 - Amorphous clay minerais. Chemical composition, crystalline state, synthesis and surface properties. Int. Clay Conf. Bologn a. 1981 : 385-398. Ed. Van Olphen, Veniale, Develop. Sedimentology 35, Elsevier Publ.

WADA K., AOMINE S - 1966 - Occurence of gibbsite in weathering of volcanic materials at Kuroishibaru, Kumamoto, Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 12 : 151-157.

WADA K., AOMINE S. - 1973 - Soit development on volcanic materials during the Ouaternary. Soil Sci., vol. 116, n° 3 : 170-177.

WADA K., GREENLAND D.J. - 1970 - Selective dissolution and differential infrared spectroscopy for characterization of ”amorphous” constituants in soit clays. Clay Min., 8 : 241-254.

WADA K., HARWARD M.E. - 1974 - Amorphous clay constituents of soils. Advance in Agronomy, 26 : 211-260.

WADA K., HENMI T., YOSHINAGA N., PATERSON S.H. - 1972 - Imogolite and allophane formed in saprolite of basait on Maui, Hawaii. Clays clay Miner., 20 : 375380.

WADA K. et HIGASHI T. - 1976 - The categories of aluminium and iron-humus complexes in Ando-Soils determined by selective dissolution. J. Soil Sci., 27 : 357368.

WADA K. HUBO H. - 1975 - Precipitation of amorphous alumino-silicates from solution containing monomeric silica and aluminium ions. J. SoiLSci., 26 : 100-111.

WADA K., (NOUE A. - 1967 - Retention of humic substances derived from rotted clouer leaves in soit containing montmorillonite and allophane. Soil Sci. Plant Nutr., 13.1: 9-16.

WADA K., INDUE A. - 1974 - Adsorption of monomeric silica by volcanic ash soils. Soil Sci. Plant. Nutr., (Tokyo), 20,1: 5-15.

WADA K., KAKUTO Y. - 1980 - Selective adsorption of Zinc on halloysite. Clays, clay Miner., 28, 5 : 321-327.

WADA K., KAWANO T. - 1978 - Use of Jefrrie Acid-Oxalate treatment in particle-site analyses of Ando-soils. Geoderma, 20 : 115-224.

WADA K., MATSUBARA I. - 1968 - D’rfferential formation of allophane, imogolite and gibbsite in the Kitakami pumice bed. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adelaïde, vol. III 123-131.

WADA K., OKAMURA Y. - 1980 - Electric charge characteristics of Ando AI and buried AI horizon soils. J. Soil Sci., 31 : 307-314.

WADA K., TOKASHIKI Y. - 1972 - Selective dissolution and difference Infra-Red Spectroscopy in quantitative mineralogical analysis of volcanics ash soil clays. Geoderma, 7 : 199-213.

WADA K., YOSHINAGA N. - 1969 - The structure of imogolite. Amer. Mineralogist., vol. 54 : 50-71.

WADA K., YOSHINAGA N., YOSSUMOTO H., et al. - 1970 - High resolution electron micrographs of imogolite. Clay Miner., 8 : 487.

WADA K., WADA S.I. - 1976 - Clay mineralogy of the B horizons of two hydrandepts, a Torrox and a Humitropepts in Hawaï. Géoderma, 16, p. 139-157.

WADA K., GUNJIGAKE N. - 1979 - Active aluminium and iron phosphate adsorption in ando soils. Soil Sci., 128, p. 331-336.

WADA S.L, ETO A., WADA K. - 1979 - Synthetic allophane and imogolite. J. Soil Sci., 30, 2 : 347-355.

WADA S.L, WADA K. - 1977 - Density and structure of allophane. Clay Min., 12 289-298.

WADA S.L, WADA K. - 1980 - Formation, composition and structure of hydroxialumino-silicate ions. J. Soit Sci., 31 : 457-467.

WADA S.I. et WADA K. - 1981 - Reactions between aluminate ions and orthosilicic acid in dilute alkaline to neutral solutions. Soil Science, 132, 4 : 267-273.

WAKATSUKI T., WIELEMAKER W.G. - 1985 - Clay mineralogy of a soil formed in peralkaline volcanic ash from the great rift valley in Kenya. Soil Sci. Plant Nutr., 31, p. 475-480.

WARKENTIN B.P. - 1972 - Use of the liquid limit in characterizing clay soils. Canadian J. Soil Sci., 52, 2 : 457-464.

WARKENTIN B.P., MAEDA T. - 1974 - Physical properties of allophane soils from the West Indies and Japan. Soil Sci. Soc. Amer..Proc., 38, 2 : 372-377.

WARKENTIN B.P., MAEDA T. - 1980 - Physical and mechanical characteristics of andisols, In BKG, Theng, ed. 281-301.

WATANABE Y. - 1963 - Etude des argiles dans les sols au microscope électronique. Part 2, allophane et gels synthétiques, Part. 3, fraction argileuse des sols dérivés de cendres volcaniques. Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., Part I et 2, 4 : 6-14 ; Part 3, 5 : 1-4.

WELLS N., FURKERT R.J. - 1972 - Bonding of water to allophane. Soil Sci., 113, 2 11-115.

WESLEY L.D. - 1973 - Cluster hypothetis and the shear strength of a tropical red clay. Géotechnique, 23, 1 : 109-113.

WESLEY L.D. - 1973 - Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. Géotechnique, 23, 4 : 471-494.

WESLEY L.D. - 1977 - Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. Géotechnique, 27, 2 : 125-136.

WEY R. SIFFERT N. - 1961 - Réaction de la silice mono-moléculaire en solution avec les ions A13+ Mg2+ In Genèse et synthèse des argiles, Ed. CNRS, Paris : 1123.

WHITE L.P. - 1967 - Ash soils in Western Sudan. J. Soil Sci. 18, p. 309-317.

WHITE R.W., SARCIA C. - 1978 - Natural and artificial weathering of basait, northwesiern United States. Bull. BRGM (2e série), Sect. II, I : 1-29.

WIELEMAKER W.G., WAKATSUKI T. - 1984 - Properties, weathering and classification of some soils formed in peralkaline volcanic ash in Kenya. Geoderma, 32. p. 21-44.

WILFREDO-VERA E., WALTER LUZIO L. - 1980 - Variaciones mineralogicas de un suelo derivado de cenizas volcanicas (Vitrandepts), sometido a lixiviacion experimental (Chile). Anal. Edafol. Agrobiol., 39, 7-8 : 1193-1203.

WRIGHT A.C.S. - 1985 - The andosols of humic allophane soils of Southern America. In: Workf Soil Re-

sources Report 14, FAO/UNESCO p. 9-22.

YAMAGUCHI M., NAKAI M., et YOSHINAGA N. - 1975 - Formation of imogolite in volranic ash layers erupted in 1914 (Taisho-ash) and in 1778-1780 (Anéi-ash) from Mt Sakurazima. Abst. Ann. Mset. Soc. Soil Sci., Soil Manure, Japan, 21 : 26.

YAMAKA S. - 1977 - Distribution and morphology of soils derived from volcanic ash in Japan. In : Y. Ishizuka and C.A. Black (Ed.) Soils derived from volcanic ash in Japan. CIMMYT, Mexico, p. 1-9.

YAMANAKA K., YAMADA Y. - 1964 - Distribution of volcanic ash soils. In : Volcanic ash soils in Japan. Ministry of Agriculture and Forestry, Japanese Government, p. 47.

YOSHINAGA N. - 1966 - Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosoils and weathered pumices. Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 12, 2: 47-54.

YOSHINAGA N. - 1967 - The behaviour of adsorbed water in clays on addition of inorganic electrolytes as aquerous solution. Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 13, I : 1-8.

YOSHINAGA N. - 1968 - Identification of imogolite in the filmy gel materials in the Imaüchi and the Shichi-honzakura pumice beds. Soil Sci. Plant Nutrit. Jap. 14, 6 : 238246.

YOSHINAGA N., AOMINE S. - 1962 - Allophane in some Ando Soils. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 8, 2 : 6-13.

YOSHINAGA N., AOMINE S. - 1962 - Imogolite in some Ando Soils. Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap., 8, 3 : 114-121.

YOSHINAGA N., YAMAGUCHI M. - 1970 - Adsorption of polyphosphates by allophane. Soil Sci. Plant Nutrit. Jap., 16, 3 : 121-127.

HYOSHINAGA N., YAMAGUCHI M. - 1970 - Occurence of imogolite as a gel film in the pumice and scoria beds of western and central Honshu and Hokkaïdo. Soil Sci. Plant. Nutrit., 16, 5 : 215-223.

YOSHINAGA N., NAKAI H., YAMAGUCHI M. - 1973 - Unusual accumulation of gibbsite and halloysite in the Kitakami pumice bed, with a note on their genesis. Clay Sci., 4 : 155- 165.

YOSHINAGA N., YOTSUMOTO H., IBE K. - 1968 - An electron microscopic study of soil allophane with an ordered structure. Amer. Mineralogist., 53, 1-2, : 319-322.

YOUNGBERG C.T., DYRNESS C.T. - 1964 - Some physical and chemical properties of pumice soils in Oregon. Soil Sci., 97 : 391-399.

ZAVALETA A. - 1969 - Geographical distribution and characteristics of soit derived from volcanic ash of Peru. In Panel of volcanic ash soils in Latina America. Turrialba, Costa Rica, A.2 : 1-14.

ZEBROWSKI CI. - 1971 Propriétés des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra (Madagascar). Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie, IX, 1 : 83-108.

ZEBROWSKI CI. - 1975 - Propriétés et pédogénèse de certains sols sur roches volcaniques de la région d'Antsirabe (Madagascar). Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie, XIII, 1 :49-59.

ZUNINO 1/.H. - 1983 - Ecologia microbiana, acumulacion de humus y fertilidad en suelos alofanicos. Suelos Ecuatoriales, 13 (1), p. 23-35.

ZUNINO H., APPELT H., BERNARDI C. - 1974 - Influence of extracted aluminium on organic malter fractionation in soils derived from volcanic ash. Soil Sci., 118, I 28-30.

A.2.8 Signification des sigles

ADEEAR : Atelier Départemental d'Etudes Economiques et d'Aménagement Rural

ARTAS : Association Réunionnaise pour le Développement de la Technologie Agricole et Sucrière

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

CAH : Commissariat à l'Aménagement des Hauts

CDDP : Centre Départemental de Documentation Pédagogique

CNDP : Centre National de Documentation Pédagogique

CRDP : Centre Régional de Documentation Pédagogique

CTFT : Centre Technique Forestier Tropical (Département du CIRAD)

CTICS : Centre Technique Interprofessionnel de la Canne à Sucre

DRS : Défense et Restauration des Sols

EDE : Etablissement Départemental de l'Elevage

IZNIEFF : Inventaire des Zones.d'Intérêts Ecologiques, Faunistique et Floristique

OLAT : Opération Locale d'Aménagement de Terroirs

PMES : Plan de Modernisation pour l'Economie Sucrière

SAR : Schéma d'Aménagement Régional

A.3 index

Index

Symbols

épierreuse «Kverneland», 306
équateur thermique, 57
équipe et appui à la rédaction de ce travail, 4
été austral, 57
été austral chaud, 57
été boréal, 57

A

anticyclone de l'océan Indien, 58
avoune, 117

C

climat
- évolution des centres barométriques, 57
- alizé, 58
- averses à intensités maxima, 68
- masses d'air océaniques, 57
- origine du climat contratsé, 55
- régimes pluvio-nuageux particuliers, 58
- records de pluies, 68
- repères, 25
- saison au vent, 62
- saison sous le vent, 62

climat:
- niveaux remarquables de déficit climatique, 101

CUMA PROCANNE, 174

D

découpage spatial du paysage, 32
divers critères retenus pour la subdivision spatiale, 32
dodo, 104

E

espèces ligneuses rares, 114
espèces végétales de la forêt semi-xérophile, 109
espèces végétales indigènes en «régénération», 129
espèces végétales ligneuses, 114
espèces végétales rares, 110
espèces végétales : noms latins
- (Nastus borbonicus, 273
- S, 113
- Abutilon exstipulare, 110
- Acacia decurrens, 108, 294, 311
- Acacia famesiana, 109
- Acacia farnesiana, 176, 180
- Acacia heterophylla, 115–117, 131, 137, 139, 273
- Acanthophoenix rubra, 123
- Acanthophoenix tubra, 115, 116
- Agauria buxifolia, 123
- Agauria salicifolia, 114, 123, 320
- Agrostis salaziensis, 120, 139
- Agrostis sp., 120
- Albizia lebbeck, 109, 111, 126, 129, 176, 180
- Anthoxanthum odoratum, 269
- Antidesma madagascariense, 115, 116
- Antirhea borbonica, 115, 320
- Antirhea verticillata, 116, 123
- Aphloia theiformis, 115, 116
- Aristida depressa, 157, 180
- Asplenium lineatum, 123
- Badula fragilis, 116
- Badula grammisticta, 115
- Berenice arguta, 116
- Bernera borbonica, 114
- Bertierarufa , 115
- Blechnum tabulare, 123, 320
- Boehmeria macrophylla, 115
- Boehravia coccinea, 121
- Bothriochloa , 334
- Bothriochloa pertusa, 109, 111, 157, 176, 180
- Calanthe sylvatica, 123
- Calophyllum tacamahaca, 114
- Calophyllum takahamaka, 123
- Carex borbonica, 120, 139
- Carissa xylopicron, 110
- Carpa sp., 120
- Carpha sp., 120, 139
- Casearia coriacea, 114
- Cassia siamea, 129
- Casuarina équisetifolia, 121
- Casuarina cunninghamiane, 129
- Casuarina equiselifolia, 109
- Casuarina equisetifolia, 127, 129, 320
- Centella asiatica, 121
- Chassalia corallioides, 115
- Chassalia gaertneroîdes, 115
- Chassalia gaertneroiaes, 124
- Chionathus broomeana, 114
- Cinnamomum camphora, 129

Claoxylon glandulosum, 115
Claoxylon racemiflorum, 114
Claoxylon setosum, 116
Clematis mauritiana, 116
Clerodendron heterophyllum, 110
Coffea mauritiana, 114
Coloccasia antiquorum, 122
Commelina diffusa, 122
Cordemoya integrifolia, 114
Cossignia pinnata, 110
Costularia melicoides, 120, 139
Croton mauritianus, 110
Cryptomeria japonica, 129
Cyathea borbonica, 115, 116, 123
Cyathea excelsa, 115, 116
Cyathea glauca, 116, 124
cyathea glauca, 115
Cyclosorus interruptus, 122
Cynodon dactylon, 121, 122
Cynoglossum borbonicum, 119
Cyperus articulatus, 122
Cyperus expansus, 122
Cyperus papyrus var. madagasceriensis, 122
Cyperus rotondus, 272
Dactylis glomerata, 269
Dactyloctenium aegyptium, 121
Delosperma napiforme, 121
Desmodium incinatum, 269
Desmodium intortum, 269
Dichrostachys cinerea, 109, 127
Dicranopteris linearis, 123
Digitaria , 334
Diospyros borbonica, 109, 114
Dodonea viscosa, 110
Dombeya acutangula, 110
Dombeya ciliata, 114
Dombeya ferruginea, 115
Dombeya ficulnea, 115, 124
Dombeya pilosa, 115
Dombeya populnea, 110
Dombeya reclinata, 115
Doratoxylon apetalum, 115, 116
Dracaena reflexa, 115, 116
Drypetes caustica, 114
Eichhomia crassipes, 122
Elaeodendron orientale, 109, 114
Eleocharis equisetina, 122
Embelia angustifolia, 116
Erythroxylon hypericifolium, 110
Erythroxylon laurifolium, 109, 123
Eteocharis sp., 120
Eucalyptus globulus, 129
Eugenia buxifolia, 110
Eugenia mespiloides, 110
Euodia obscura, 116
Euphorbia goliana, 121
Faujasia flexuosa, 116
Faujasia pinifolia, 119
Faux Poivrier ou encens Schinus, 127
Fesfuca borbonica, 134
Festuca arundinacea, 269
Festuca borbonica, 120, 139
Ficus densifolia, 114
Ficus reflexa, 110
Ficus rubra, 110, 114
Foetidia mauritiana, 110
Forgesia racemosa, 115
Furcraea , 180
Furcraea foetida, 109, 111, 126, 176
Gaerlnera vaginata, 115
Gaertnera vaginata, 116
Gastonia cutispongia, 110
Geniostoma angustifolia, 115
Geniostoma angustifolium, 116
Geniostoma borbonicum, 123
Grevillea robusta, 129
Hedychium gartnaerianum H. flavescens, 126
Helichrysum , 116
Helichrysum arnicoides, 120, 139
Helichrysum heliotropiforma, 116
Helichrysum heliotropiforme, 119, 137, 139
Hemandia mascarenensis, 114
Heterochaenia borbonica, 116
Heterochaenia ensifolia ,, 116
Heterochaenia rivalsii, 119
Heteropogon contortus, 109, 111, 121, 157, 176, 180, 334
Hibiscus boryanus, 114
Hibiscus columnaris, 110
Histiopteris incisa, 116
Holcus lanatus, 269
Homalium , 113
Homalium paniculatum, 114
Hugonia serrata, 113
Huperzia saururus, 120, 139
Hydrilla , 122
Hyophorbe indica, 114
Hypericum lanceolatum, 119, 137, 139
Hyptage benghalensis, 111, 126
Indigofera ammoxylon, 110
Ipomea pescaprae, 121
Ischaenum koleostachys, 120, 139
Jussiena suffruticosa, 122
Killinga sp, 272
Labourdonnaisia calophylloides, 114, 123
Labourdonnaisia calophyllouies, 131

Lantana camara, 111, 126, 335
Lepturus repens, 120
Leucaena glauca, 126, 180
Leucaena leucocephala, 109, 111, 176
Leucaena leucocephala (v. salvador), 269
Ligustrum robustum var. Walkeri, 126
Litsea chinensis, 144, 180
Litsea glutinosa, 111, 126, 335
Lobelia serpens, 121
Lomatophyllum macrum, 110
Lycium , 120
Lycopodiella affinis, 120
Lysimachia mauritania, 121
Machaerina , 123
Machaerina iridifolia, 116, 123, 320
Maillardia borbonica, 115
Memecylon confusum, 114
Mimusops , 113, 123
Mimusops maxima, 109, 114, 131
Molinaea altemifolia, 115
Molinaea alternifolia, 116
Monimia rotundifolia, 115
Mussaenda landia, 114
Nastus borbonicus, 116
Nephrolepis abrupta, 122, 123, 320
Nephrolepis biserrata, 123, 320
Nephrolepsis abrupta, 320
Nuxia verticillata, 115, 116, 123, 320
Obetia ficifolia, 110
Ochrosia borbonica, 109, 114
Ocotea obtusata, 115, 116
Olea europaea subsp. africana, 110
Olea lancea, 109
Pandanus montanus, 115, 116, 123
Pandanus purpurescens, 114, 121
Panicum lycopodioides, 120, 134
Panicum lycopodloides, 139
Panicum maximum, 111, 176
Paspalidium geminatum, 122
Pennisetum caffrum, 120, 134, 139
Pennisetum clandestinum, 269
Philica nitida, 134, 139
Philippia , 123
Philippia arborescens, 116, 123
Philippia galioides, 137
Philippia gatioïdes, 119
Philippia montana, 116, 117, 119, 123, 137, 139
Phylica nitida, 119, 137
Phyllanthus phyllirifolius, 115, 116
Pinus patula, 129
Pinus pinaster, 129
Pisonia lanceolata, 114
Pithecellobium duice, 111
Pithecellobium dulce, 109, 176, 180
Pittosporum senecia, 114
Poa borbonica, 120, 139
Polygonum sp., 122
Polyscias aemiliguineae, 114
Polyscias rivalsii, 114
Portulaca oleracea, 121
Poupartia borbonica, 110
Pourpartia borbonica, 110
Prosopis juliflora, 109, 127, 176, 180
Psiadia boivini, 116, 123
Psiadia retusa, 120
Psidia , 121
Psidium caftleianum, 320
Psidium cattieianum, 125
Psidium cattleianum, 111, 125, 144
Psiloxylon mauritianum, 114
Pteris scabra, 123
Pyrostria oleoiaes, 110
Rhynchefyfrum repens, 334
Rhynchospora sp., 120
Rubus alcaefolius, 125
Ruizia cordata, 110
Scaevola taccada, 121
Schinus terebenthifolius, 111, 121, 144, 177, 180, 335
Scolopia heterophylla, 110
Securinega durissima, 110
Selaginella obtusa, 121
Senecio ambavilla, 116, 123, 320
Senecio huberta, 134, 137
Senecio hubertia, 119, 139
Senecio penicellatus, 116
Senecio squamosus, 119
Sideroxylon , 113
Sideroxylon borbonicum, 116, 123, 124, 320
Sideroxylon borbonicum v. capuronii, 114
Sideroxylon majus, 114
Solanum auriculatum, 126
Sophora denudata, 120
Sporobolus , 271, 334
Stenotaphrum dimidiatum, 121
Stereocaulon vulcani, 122, 123, 320
Stillingia lineata, 110
Stoebe passerinoides, 119, 123, 134, 137, 139
stoebe passerinoides, 116
Strongylodon siderospernum, 114
Syzygium bomonicum, 123
Syzygium borbonicum, 114
Syzygium cordemoyi, 114
Syzygium cymosum, 114
Syzygium jambos, 111, 125, 127, 144

Tabemaemontana persicariaefolia, 110
Tabernaemontana mauritiana, 114
Tamarindus indica, 180
Tambourissa elliptica, 115
Tambourissa quadrifida v. micrantha, 114
Terminalia bentzoe, 108, 131
Themeda quadrivalvis, 111, 334
Themeda triandra, 176
Tournefortia arborea, 110
Tournefortia argentea, 121
Trochetia granulata, 116
Turraea ovata, 116, 124
Typha angustifolia, 122
Ulex europeanus, 127, 138
Vemonia fimbrillifera, 115
Vernonia fimbrillifera, 116
Weinmannia tinctoria, 115, 116
Xylopia , 123
Xylopia richardii, 114
Zanthoxylum heterophyllum, 110
Zoizia tenuifolia, 121
espèces végétales : noms vernaculaires
., 177, 269
affouche, 114
affouche batard, 110
affouche rouge, 110
agave = «choca vert», 109
ajonc, 127
Algaroba, 109, 127
ambaville, 116, 119, 123, 134
Ambaville blanc, 134
ambaville blanc, 119
avocat marron, 111, 126, 144, 180, 335
bambous-«calumets», 273
benjoin, 131
bois amer, 110
bois blanc, 114
bois blanc rouge, 110
bois d'éponge, 110
bois d'huile, 110
bois d'oiseau, 115
bois d'oiseaux, 116
bois d'olive blanc, 109
bois d'olive noir, 110
bois d'ortie, 110
bois d'osto, 115, 116, 123
bois de balai, 114
bois de banane, 114, 123
bois de bibasse, 115
bois de cabri, 115, 116
bois de cabris rouge, 114
bois de Cannelle, 116
bois de cannelle, 115
bois de chandelle, 115, 116
bois de chenilles, 110
bois de corail, 115
bois de fer bâtard, 123
bois de fer batard, 116
bois de fer blanc, 114
bois de gaulette, 115, 116
bois de juda, 110
bois de lait, 110, 114
bois de maman, 115
bois de négresse, 115, 116
bois de nèfles, 110
bois de pêche marron, 110, 114
bois de papaye, 114
bois de pomme, 114
bois de prune, 110
bois de raisin, 114, 115
bois de rat, 123
bois de reinette, 110
bois de rempart, 114, 123
bois de sable, 110
bois de savon, 115, 116
bois de senteur, 110
bois de source, 115
bois de tabac, 116, 123
bois de tambour, 114, 115
bois dur, 110
bois jaune, 109, 114
bois maigre, 115, 116, 123
bois mussard, 110
Bois noir, 176
bois noir, 109, 111, 129, 180
bois noir des bas, 126
bois noir des Hauts, 109, 114
bois puant, 110
Bois rouge, 109
bois rouge, 114
bois strictes de perroquet, 114
branle blanc, 116, 119, 123, 134, 137
branle vert, 116, 119, 137
branles verts, 123
bringellier marron ou «tabac marron», 126
cadoque, 114
café marron, 114
calumet, 116
Camphrier, 129
cassi, 109, 111, 126, 176, 180
cassi du Siam, 129
catafaille, 116
change écorce, 115, 116
chiendent, 121
choca bleu, «choca cader», «choca baïonnette», 180

choca vert, 111
choca vert ou «agave», 176
coeur bleu, 114
corce blanc, 114
corce blanc batard, 114
cryptomeria, 129
dactyle prairial, 269
Elodées, 122
encens, 121, 180, 335
fétuque élevée, 269
fanjan, 116
fanjan femelle, 115
fanjan ou fanjan mâle, 115
fataque, 176
faux poivrier, 144
faux poivrier ou encens, 111
filao, 109, 121, 127
Filao de Nouvelle Hollande, 129
Filao pays, 129
flouve odorante, 269
foin, 180
fougères arborescentes, 116
galabert, 111, 335
galabert ou corbeille d'or, 126
gazon bord de mer, 121
goyavier, 111, 125, 144
grévillaire, 129
grand bois cassant, 114
grand natte, 109, 114, 131
Grand Tamarin des Hauts, 131
gros bois de rongue, 109, 123
gros quivi, 116
herbe de l'eau, 122
houlque laineuse, 269
iracois marron, 114
jacinthe d'eau, 122
jam-rosat, 111, 125, 127
jambelon, 272
jamrosat, 144
joli coeur, 114
Kader ou Choca vert, 126
kikuyu, 269
lanterne chinoise, 127
lavangère, 121
Le troène ou privet, 126
liane marabit, 116
liane papillon, 111, 126
liane savon, 116
liane zig-zag, 116
longoses, 126
losto café, 115, 116
mahot batard, 114
mahot rempart, 110
mahot rouge, 115
mahot tantan, 110
mapou, 115
marie éreintée, 271
mauve, 110
mazambron marron, 110
oumine, 272
palmiste poison, 114
palmiste rouge, 115
palmistes, 116
papyrus, 122
Patate à Durand, 121
persicaire, 122
petit bois cassant, 115
petit mahot, 115
Petit natte, 131
petit natte, 114, 123
petit tamarin des hauts, 120
pin maritime, 129
piquant blanc, 180
piquant jaune, 176, 180
piquant rouge, 176
poivrier des Hauts, 110
quinquina pays, 114
sabre, 116
saliette, 120
songe noir, 122
takamaka, 114, 123
tamarin de l'Inde, 109, 111, 176, 180
Tamarin des bas, 180
tamarin des hauts, 116
Tan georges, 116
tan georges, 115
tan rouge, 115, 116
terebenthifolius, 127
thym marron, 119
Ti bois de senteur, 110
trainasse, 121
Vacois, 121
velours blanc, 116, 119
veloutier, 121
veloutier vert, 121
vigne marronne, 125
vrai bois de fer, 114
zépinard, 109, 176
zacacia, 180
zacacia zépinard ou Algaroba, 180
zazacia, 176

F

Firinga, 66
forêts à Acacia heterophylla, 117

H
hiver austral frais, 57
Hyacinthe, 327, 337, 419, 458, 462, 464
Hyacynthe, 66

L
labour chimique au round up, 175

M
mascareignite, 118

N
nature et répartition des sols : clefs de distribution, 25

P
paraplow, 174
pestes végétales menaçantes, 125
pluies, 61
pluies orographiques, 57
principales zones hydromorphes ou marécageuses littorales, 121
PROMOCANNE, 268

R
rôle de l'intégrateur, 31
roche pintade, 45, 160, 164
ROLLOSEM, 272

S
slicken sides, 158
Sucreries de Bourbon, 168, 173, 346

T
test du couteau, 260
test du malaxage, 260
trajectoires des cyclones, 65

V
vétyver, 107
verre volcanique, 333
vertisols grumosoliques, 182

Y
ylang-ylang, 107

Z
zônes où éviter les cultures, à boiser, 339
zone au vent, 55
zone sous le vent, 55

Glossaire

– CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

– IRAT : Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières - actuellement le Cirad/CA

– ZCIT : zone de convergence intertropicale

– CERF : Centre d'Essai de Recherche et de Formation

– SREPEN : Société Réunionnaise pour l'Etude et la Protection de l'Environnement

– ORSTOM : Actuel IRD, Institut de Recherche pour le Développement

– ONF : Office National des Forêts

– UICN : Alliance Mondiale pour la Nature

– CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole en Commun

– DDE : Direction Départementale de l'Equipement

– INRA: Institut National de la Recherche Agronomique

– REDETAR : Régie Départementale des Travaux Agricoles et Ruraux

– DAF : Direction de l'Agriculture et de la Forêt

– AFP : Association Foncière Pastorale

– SAFER : Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural

– Société d'Aménagement des Périmètres Hydro-agricoles de la Réunion

– CEEMAT : Centre d'Etudes et d'Expérimentation en Mécanisation Agricole et Technologie Alimentaire

– Société Coopérative d'Intérêt Collectif Agricole

– IRFA : ex-Institut de Recherches sur les Fruits et les Agrumes (Département du CIRAD)

– SUAD : Service d'Utilité Agricole et de Développement

– Institut Technique d'Elevage Bovin

– IEMVT : Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux (Département du CIRAD)

– APR : Association pour la Promotion Rurale