Gestion des effluents d'élevage à La Réunion : transformer la nuisance en fertilité

Programme de recherche CORDET 94 DA 51
Rapport final

Paillat J.M., mars 1998

Gestion des effluents d'élevage à La Réunion : transformer la nuisance en fertilité

Programme de recherche CORDET 94 DA 51

Rapport final

Paillat J.M., mars 1998

Nous tenons à remercier la Commission d'Orientation Recherches dans les DOM-TOM qui, grâce à l'octroi d'un financement, a permis au CIRAD de la Réunion de développer des recherches dans le domaine de la gestion des déchets par l'agriculture. Avec l'apport de cette nouvelle thématique de recherche, en complément des approches environnementales s'intéressant à la biodiversité et à la durabilité des exploitations agricoles, le projet "gestion des espaces et des ressources naturelles" a pu être structuré et développé, débouchant ainsi sur l'émergence d'un pôle de compétence "agriculture durable et environnement".

I. Introduction

La gestion des effluents d'élevage est devenue un enjeu important compte tenu des pollutions qu'ils peuvent engendrer. Les législations française et européenne prennent en compte ces problèmes et ont élaboré des directives à l'intention des éleveurs et/ou utilisateurs de déchets agricoles (règlement sanitaire départemental, codes des bonnes pratiques agricoles, décret n° 96-163 sur les zones vulnérables ; *in* : M.V.A.D., 1996). L'application de ces directives devient contraignante et impose une recherche de solutions adaptées à chaque contexte agricole. Les agriculteurs sont de plus en plus conscients des problèmes posés et sont demandeurs d'un appui en recherche et développement pour les aider à les résoudre.

A La Réunion, l'intérêt des apports de matières organiques pour améliorer la fertilité de sols souvent fragiles conduit à privilégier le transfert des matières organiques rejetées par les élevages vers les productions végétales. Deux constats peuvent être faits. D'une part, le développement des élevages (notamment hors sol) depuis une dizaine d'années conduit à une concentration importante d'effluents dans certaines régions de l'île, avec les problèmes de pollution qui en découlent par insuffisance de conditionnement, de traitement et de valorisation. D'autre part, les productions maraîchères ont besoin d'un apport important de matière organique pour maintenir ou même souvent restaurer la fertilité des sols soumis à une forte érosion due au relief et à la pluviométrie importante. La gestion de ces matières organiques, grâce notamment à des transferts de proximité inter-exploitations, est un enjeu important pour répondre à ces deux attentes.

Cette opération de recherche s'intéresse donc particulièrement à la valorisation agronomique des effluents d'élevage. Deux objectifs principaux sous-tendent les études menées :

- identification des risques de pollution lors du stockage et de l'utilisation des effluents,
- proposition de solutions de valorisation de ces effluents par les réseaux d'échange entre exploitations à l'échelle de petites régions avec, le cas échéant, des traitements adaptés.

L'approche repose dans un premier temps sur le diagnostic des pratiques agricoles et des stratégies des éleveurs et utilisateurs de matière organique (maraîchers principalement) concernant la gestion des déchets. Les transferts entre exploitations, à l'échelle locale ou à l'échelle régionale sont également abordés, cette connaissance constitue un préalable à une analyse des filières de gestion des matières organiques. Dans un second temps, les travaux conduits ont concerné la caractérisation des amendements organiques (analyses physico-chimiques de laboratoire) et l'évaluation de procédés de transformation des déchets (plate-formes de compostage). Enfin, des études sont en cours concernant la valorisation agronomique des déchets. Les produits attendus des recherches démarrées dans le cadre de ce projet C.O.R.D.E.T.[1] sont de deux natures : des solutions à la valorisation agricole des déchets pour les usagers (développement) et la modélisation des flux de matière organique, et de façon plus large de biomasse, avec un raisonnement des transferts de fertilité (recherche).

[1] Commission d'Orientation des Recherches dans les DOM-TOM

II. Problématique et questions de recherche

II.1. Constat

La réglementation européenne prévoit une interdiction de mise en décharge des déchets fermentescibles. Ne seront alors autorisés à entrer en décharge que les déchets ultimes (non réductibles). L'objectif premier est donc de limiter les pollutions.

Les déchets ont différentes provenances :
- urbaine (ordures ménagères, boues de station d'épuration, déchets verts),
- industrielle (polluants chimiques, organiques : vinasses, déchets d'abattoir, eaux chargées),
- agricole (lisiers, litières, fientes, fumiers, effluents liquides divers, composts).

Un projet de plan départemental d'élimination des déchets ménagers et assimilés vient d'être élaboré par le Conseil Général. Des traitements industriels peuvent être mis en place pour certains déchets (incinération par exemple). Cependant, le coût des installations est souvent très élevé pour les collectivités locales (mairies, Conseil Général, Région ...). L'utilisation en agriculture est donc une voie possible de recyclage de ces déchets et en premier lieu de ceux générés par les activités d'élevage, notamment hors sol, qui connaissent un fort développement dans certaines régions de l'île. Concernant ces effluents, l'île de La Réunion est actuellement soumise aux directives européennes, mais n'est pas classée zone vulnérable du fait d'une teneur en nitrates dans l'eau de consommation très faible.

II.2. Demande

1- La demande provient des pouvoirs publics (D.R.I.R.E.[2], D.I.R.E.N.[3], A.D.E.M.E.[4]) et des collectivités locales (mairies, S.I.V.O.M.R.[5], Conseil Général, Région) qui cherchent des solutions principalement pour les déchets urbains et industriels. L'agriculture est alors perçue comme un exutoire, alternative possible à l'incinération ou autre traitement industriel. Les espaces verts urbains ou routiers peuvent également être utilisateurs de matière organique.

2- La demande provient des industriels (usines de canne à sucre, abattoirs, industries agro-alimentaires ...) qui ont des contraintes d'épandage des eaux chargées, des vinasses (S.U.A.D.[6], 1995), non recevables actuellement en station d'épuration, des déchets carnés (Thiery, 1996), des matières stercoraires et autres déchets solides.

---

[2] Direction Régionale de L'Industrie, de la Recherche et de l'Equipement

[3] Direction Régionale de l'Environnement

[4] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

[5] Syndicat Intercommunal à Vocation Multiple de La Réunion

[6] Service d'Utilité Agricole et de Développement (Chambre d'Agriculture)

3- La demande provient des agriculteurs. Celle-ci peut être formulée de différentes manières :

- les éleveurs sont de plus en plus sensibilisés aux problèmes d'environnement et souhaitent adapter leurs infrastructures en vue d'une meilleure valorisation des déjections animales,
- les producteurs maraîchers, essentiellement, sont très demandeurs de matière organique bien stabilisée, utilisable avec le minimum de contraintes d'épandage tout au long de l'année,
- la production de canne à sucre peut, le cas échéant, valoriser certains déchets, mais l'épandage doit être concentré sur la période post récolte et hors période cyclonique,
- la production fourragère permet également d'absorber des déchets, rapidement décomposables, après chaque coupe de fourrage (7 à 8 coupes / an dans les Bas).

II.3. Problématique de développement

Quelles sont les solutions permettant de valoriser les déchets dans l'agriculture ? Quel en est le coût pour la collectivité, pour les agriculteurs ? Quel est l'intérêt agronomique de cette utilisation (économie d'intrants chimiques pour les agriculteurs) ? Quelles sont les conséquences de cette utilisation sur l'environnement (pollution des eaux, nuisances diverses) ?

Pour répondre à ces questions, une Mission de Valorisation Agricole des Déchets (M.V.A.D.) a été confiée à la Chambre d'Agriculture. Les premières réflexions conduites par cette mission, avec l'appui du C.I.R.A.D.[7], ont permis de sérier différents domaines d'action :

1- inventaires des gisements de déchets avec leurs flux et les utilisations actuelles pour aboutir à des fiches caractéristiques par produit,

2- transformations des déchets en faisant des diagnostics précis des solutions existantes et en proposant de nouveaux procédés (transferts de technologie),

3- valorisation agronomique demandant des études agronomiques particulières et faisant appel à des essais en parcelles chez des agriculteurs.

II.4. Questions de recherche posées

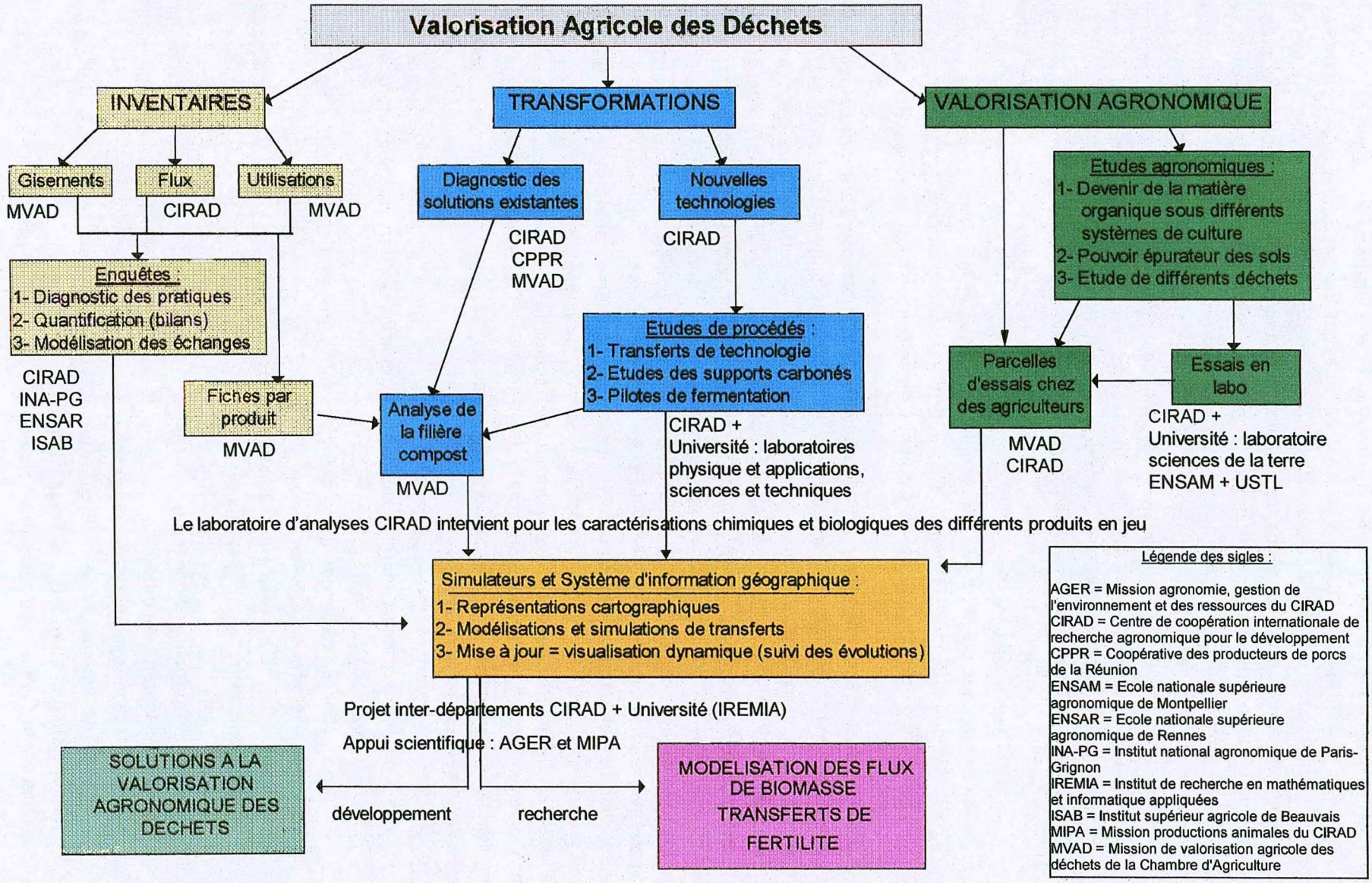
Ce cadre (figure 1) est un point de départ intéressant pour la formulation de questions de recherche. En effet, la Chambre d'Agriculture a sollicité l'intervention du C.I.R.A.D. dans différents domaines et plus spécialement celui concernant la valorisation agronomique pour lequel les références manquent et les réglementations semblent inadaptées.

En ce qui concerne le premier domaine, l'inventaire des gisements a été réalisé par la M.V.A.D. à partir de l'identification des cheptels (M.V.A.D., 1996), complétée par quelques enquêtes (bâtiments, aires, stockages ...).

---

[7] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

Figure 1 : *Propositions de thématiques de recherche s'appuyant sur la mise en oeuvre de la Mission de Valorisation Agricole des Déchets*



La caractérisation des flux, de même que l'inventaire des utilisations agricoles, fait appel à des méthodologies appropriées, notamment avec des diagnostics des pratiques et stratégies des éleveurs, mais aussi des producteurs maraîchers, voire des producteurs de canne à sucre. Ces diagnostics permettent de connaître également les utilisations agricoles des déchets et de les quantifier. L'ensemble de ces études doit aboutir à des fiches par produit (déchet), à une analyse des risques (pollution) et à des bilans régionaux (flux). Les questions de recherche qui sont posées sont les suivantes :

- Comment modéliser la diversité des pratiques agricoles en matière de gestion des déchets par les éleveurs et les utilisateurs : typologie fonctionnelle, trajectoires d'évolution (Capillon, 1993), analyse du fonctionnement des exploitations ?
- Est-ce que l'offre de déchets est en adéquation avec la demande en matière organique ? Quelles sont les conditions pour réaliser cette mise en adéquation (voirie, transport, transformation, coût ...) ?
- Quelle sont les échelles pertinentes pour appréhender les bilans de matière organique, afin de quantifier les risques de pollution (parcelle, exploitation, localité, région, île) ? Comment extrapoler les résultats obtenus d'une échelle à l'autre (D'Aquino, 1996) ?

Le second domaine s'intéresse à la transformation des déchets pour les rendre plus utilisables en agriculture et notamment en maraîchage. Il s'agit dans la plupart des cas de fabriquer des composts de qualités diverses selon les utilisations envisagées. Une évaluation des solutions existantes paraît un point de départ pour cette action. Ce travail peut être réalisé par les acteurs du développement. De cette analyse peut découler la mise en oeuvre de nouvelles technologies permettant une meilleure valorisation ou une dépollution efficace des déchets pour un coût économique compatible avec les moyens des différents acteurs (agriculteurs, organisations professionnelles, collectivités, Etat ...). Le compost est un produit fini utilisable en fonction de ses caractéristiques de stabilisation, mais il demeure un déchet à valoriser. Une analyse de la "filière compost" s'appuyant sur la caractérisation des gisements et des utilisations (première action) paraît opportune avant la mise en oeuvre de nouvelles technologies (Farinet, 1995 ; Hurvois, 1997). Ce travail est à réaliser en collaboration avec les organisations agricoles. Les questions de recherche qui sont posées concernent essentiellement les procédés :

- Comment économiser les supports carbonés, coûteux en transport et rares (la bagasse est déjà utilisée pour l'énergie), pour transformer les déchets (fermentations aérobie et anaérobie, procédés complexes ...) ?
- Quelles sont les capacités d'épuration des différents supports carbonés utilisables en fonction des déchets à traiter ?
- Comment gérer et valoriser (stockage, transport, épandage) les différents produits fabriqués (compost, eaux résiduaires, gaz ...) ?

Enfin, le troisième domaine d'actions devra traiter de la valorisation agronomique des divers produits organiques dans les différents systèmes de culture (Bourgeois, 1995 ; Chabalier, 1995 ; Pouzet, 1996). Les questions posées à la recherche sont alors les suivantes :

- Quel est le devenir de la matière organique dans les sols réunionnais (ferralitiques, andosols) sous différents systèmes de culture ?
- Quel est le pouvoir épurateur des sols et des systèmes sol-plante (Chabalier, 1997) ?

- Quel est l'aptitude des déchets à être valorisés en tant qu'amendements organiques ? Quelle est leur valeur fertilisante ? Quelle quantité épandre ? Quand ? Comment ?

Le laboratoire d'analyses du C.I.R.A.D. est un outil indispensable pour mener ces trois actions de recherche. Dans les différentes étapes des diagnostics (gisements, utilisations, transformations, lixiviations ...), il doit permettre une caractérisation fine sur le plan chimique et biologique des produits en jeu. Les références obtenues serviront à mieux gérer l'utilisation agricole des déchets (normes, règles, plans d'épandage ...) et au contrôle des pollutions organiques dans les eaux qui peuvent résulter de cette utilisation.

II.5. Méthodologies mobilisées

Les méthodologies mises en oeuvre sont très diversifiées, dans la mesure où les opérations de recherche concernées s'intéressent à différentes échelles. Elles sont complémentaires. On peut lister les méthodes suivantes :

- enquêtes : analyse globale des exploitations, questionnaires simplifiés,
- analyse des coûts : stockage, transformation, transport, épandage,
- analyse de filière : compost, lisier, fumier,
- suivis de pilotes : fermenteurs, aires de compostage,
- tests en laboratoire : colonne de rétention, essais agronomiques en pots,
- suivis de parcelles : cuves lisymétriques, bougies poreuses, tensiométrie,
- cartographie : SIG, représentations graphiques,
- modélisation des flux : déchets, azote, phosphore, biomasse carbonée,
- raisonnement des transferts de fertilité : unités fertilisantes, économie d'engrais.

III. Inventaire du gisement des déchets

La Chambre d'Agriculture de la Réunion, grâce au travail de la M.V.A.D., vient de publier un important document sur le gisement de déchets organiques issus de l'agriculture et du milieu urbain (M.V.A.D., 1996). Il est intéressant de s'y référer pour situer la place des effluents d'élevage dans les déchets fermentescibles produits sur l'île. Ce document présente dans un premier temps des fiches caractéristiques des déchets fermentescibles d'origines végétale ou animale produits à la Réunion. Les tonnages de déchets et leurs teneurs en éléments principaux sont indiqués. Un recensement par commune est ensuite proposé avec la prise en compte de l'évolution quantitative et qualitative prévue à l'horizon 2000, en fonction des équipements urbains programmés (stations d'épuration, plate-formes de compostage) et de l'évolution des élevages. Enfin, des hypothèses de saturation des surfaces épandables (surfaces cultivées et espaces verts) sont proposées par commune, région (Nord, Ouest, Sud et Est) et pour l'ensemble de l'île. Ces hypothèses se basent (i) sur la part des surfaces épandables dans la S.A.U. (20 ou 40 %, étant donné les difficultés d'épandage à la Réunion dues à la pente, la pierrosité, l'accès difficile ...) et, (ii) sur les possibilités d'optimisation des épandages, soit dans un cadre réglementaire strict actuel (210 N ha^{-1} par an), soit en tenant compte des réductions possibles du gisement (volatilisation de l'azote, réduction de N et P par traitement à la source).

Les déchets industriels (écumes, vinasses, drèches, divers) sont estimés pour 1996 (inventaire par la M.V.A.D. en cours) à environ 220000 t (35000 t de MS et 750 t d'azote). Les écumes (240 t d'azote) sont épandues au champ et les divers déchets des industries agro-alimentaires peuvent également être considérés comme tels (estimation à 160 t d'azote). Par contre, les vinasses (340 t d'azote), riches en potasse, sont actuellement enfouies en puits profonds ou s'écoulent en mer et les drèches de brasseries sont utilisées en alimentation animale.

Les déchets agricoles et urbains épandables (recensement effectué par la M.V.A.D.) représentent 512800 t par an (80560 t de MS et 3080 t d'azote). Les effluents d'élevage représentent la part essentielle des déchets agricoles et urbains épandables : 97 % du tonnage brut (70 % en considérant les déchets industriels épandus et les vinasses), 90 % du tonnage en MS (65 % avec les déchets industriels) et 95 % de l'azote (77 % avec les déchets industriels). Une attention toute particulière doit donc être portée au gisement des effluents d'élevage. Les effluents porcins et bovins totalisent la part essentielle de l'azote produit par les élevages (39 et 38 % respectivement). Parmi les effluents d'élevage, les bovins produisent plus de 50 % de la masse sèche (16 % pour les effluents porcins) mais, du fait de leur dilution, les lisiers de porcs concernent 46 % de la masse brute (41 % pour les effluents bovins).

Actuellement, pour les déchets agricoles et urbains, les régions Ouest et Sud sont excédentaires, par rapport à leur capacité de valorisation agronomique, ou susceptibles de le devenir à l'horizon 2000. Par contre, les régions Nord et Est ne sont pas saturées. Elles risquent cependant de le devenir en l'an 2000. Les communes du Sud produisent 56 % des effluents bruts et 53 % de l'azote épandable. En considérant la surface agricole et d'espace vert, près de la moitié des communes sont proches de la saturation en azote provenant des déchets : certaines avec des quantités dépassant 160 N ha^{-1} de S.A.U.[8] par an, d'autres avec des quantités comprises entre 100 et 160 N ha^{-1} de S.A.U. par an.

Les déchets produits sur l'île représentent en 1996 un apport potentiel d'environ 70 N ha^{-1} de S.A.U.. Les apports de fertilisants minéraux sur l'île (environ 2500 t d'azote) sont assez stables chaque année, soit environ 40 N ha^{-1} de S.A.U. (d'après Agreste, 1993). Or, si l'on ne tient compte que des surfaces où l'épandage d'effluents est possible (40 % étant un taux optimiste pour les conditions réunionnaises), les surfaces agricoles sont potentiellement saturées en fertilisants azotés, en regard des normes admises hors zones vulnérables par la réglementation, c'est à dire 210 N ha^{-1} (*in* : décret n° 96-163 du Ministère de l'Environnement).

Dans ce contexte, il est indéniable que le devenir des effluents, principalement d'élevage, devrait constituer une priorité d'action pour les collectivités dans les années à venir. A la lecture de ces données intéressantes (M.V.A.D., 1996), il nous semblent que plusieurs enjeux apparaissent déterminants pour les futures actions de recherche et de développement :

- mobiliser le plus possible de surface épandable (actuellement, les 20 % de S.A.U. considérés comme épandables ne permettent pas d'écouler les déchets produits) ; la nécessité de mécaniser les parcelles, pour des raisons économiques liées à la récolte de la canne à sucre notamment, devrait augmenter les potentialités d'épandage ;

---

[8] Surface Agricole Utile

- déterminer les conditions d'épandage (plans) des différents effluents en liaison avec les besoins des cultures dans les conditions tropicales (Bourgeois, 1995) ; des essais agronomiques sur le pouvoir épurateur des sols et les potentialités d'absorption des plantes sont en cours, ceci afin de proposer une adaptation des normes ;
- réduire les pollutions par une alimentation plus adaptée des animaux (Hurvois, 1997) : aliment bi-phase en élevage porcin, réduction des concentrés en élevage bovin ;
- trouver des solutions de dépollution des effluents d'élevage (Farinet, 1995 ; Hurvois, 1997) ;
- favoriser les échanges de matière organique entre exploitations, localités et régions en adaptant les produits à la demande des agriculteurs ; des solutions de compostage sont à l'étude de manière à réduire les volumes d'effluents liquides (lisiers principalement) difficiles à valoriser (Fraboulet *et al.*, 1998) ; la mobilisation de support carboné (paille de canne à sucre) pour le compostage ou pour servir de litière aux bovins doit également permettre un meilleur recyclage des effluents ;
- promouvoir l'utilisation des matières organiques par rapport à l'importation d'engrais minéraux à travers une filière organisée de transfert (réduction des coûts de transport et d'épandage) entre producteurs et utilisateurs ;
- privilégier la résorption des déchets d'élevage sur les terres agricoles, les déchets urbains pouvant trouver une autre valorisation lors de la création des espaces verts, ou pouvant être facilement incinérés du fait de la centralisation obligatoire par la collecte auprès des particuliers.

IV. Pratiques de gestion de la matière organique

Face aux enjeux de valorisation des effluents d'élevage, le premier travail de l'opération de recherche "gestion des effluents d'élevage" co-financée par le C.I.R.A.D., la Région Réunion et la C.O.R.D.E.T., a consisté à étudier les pratiques mises en oeuvre par les éleveurs et les agriculteurs pour valoriser les déchets d'élevage ou se procurer la matière organique nécessaire aux cultures. Trois situations contrastées ont été étudiées.

- une approche régionale, c'est à dire regroupant plusieurs localités ayant des vocations agricoles différentes et éloignées en terme de temps de transport (figure 2) : c'est le cas du cirque de Salazie (Reynaud, 1995) ; cette région est excédentaire en déchets organiques du fait de l'importance de l'élevage et de la rareté des surfaces épandables (Raunet, 1991) ;

- une approche locale, c'est à dire regroupant un nombre plus restreint d'exploitations peu éloignées les unes des autres : c'est le cas de la localité de Dos d'Ane (figure 3), commune de la Possession (Paillat *et al.*, 1996) ; cette localité pouvait être considérée en équilibre du fait de la présence d'élevages hors sol et de producteurs maraîchers intensifs ;

- une approche au niveau de l'exploitation, l'objectif étant d'analyser le fonctionnement (objectifs, règles, décisions) des exploitations en regard de l'utilisation de la matière organique (Vimeux L., 1998) : plusieurs exploitations de la région des Hauts de l'Ouest ont été choisies pour leur diversité de pratiques dans un contexte de conservation voire de restauration de la fertilité des sols (Perret *et al.* , 1997).

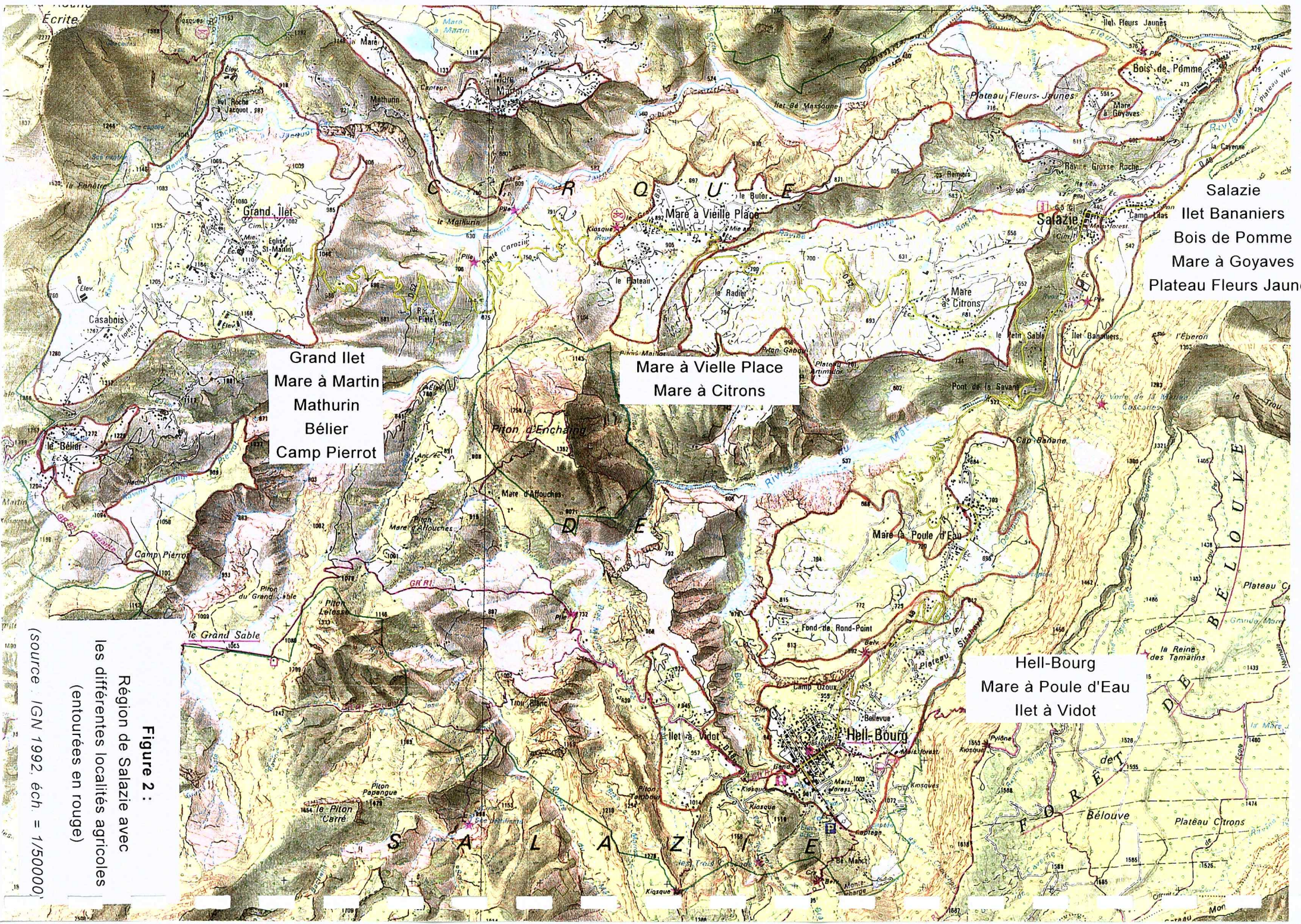


Figure 2 :
Région de Salazie avec
les différentes localités agricoles
(entourées en rouge)

(source : IGN 1992, éch. = 1/50000)

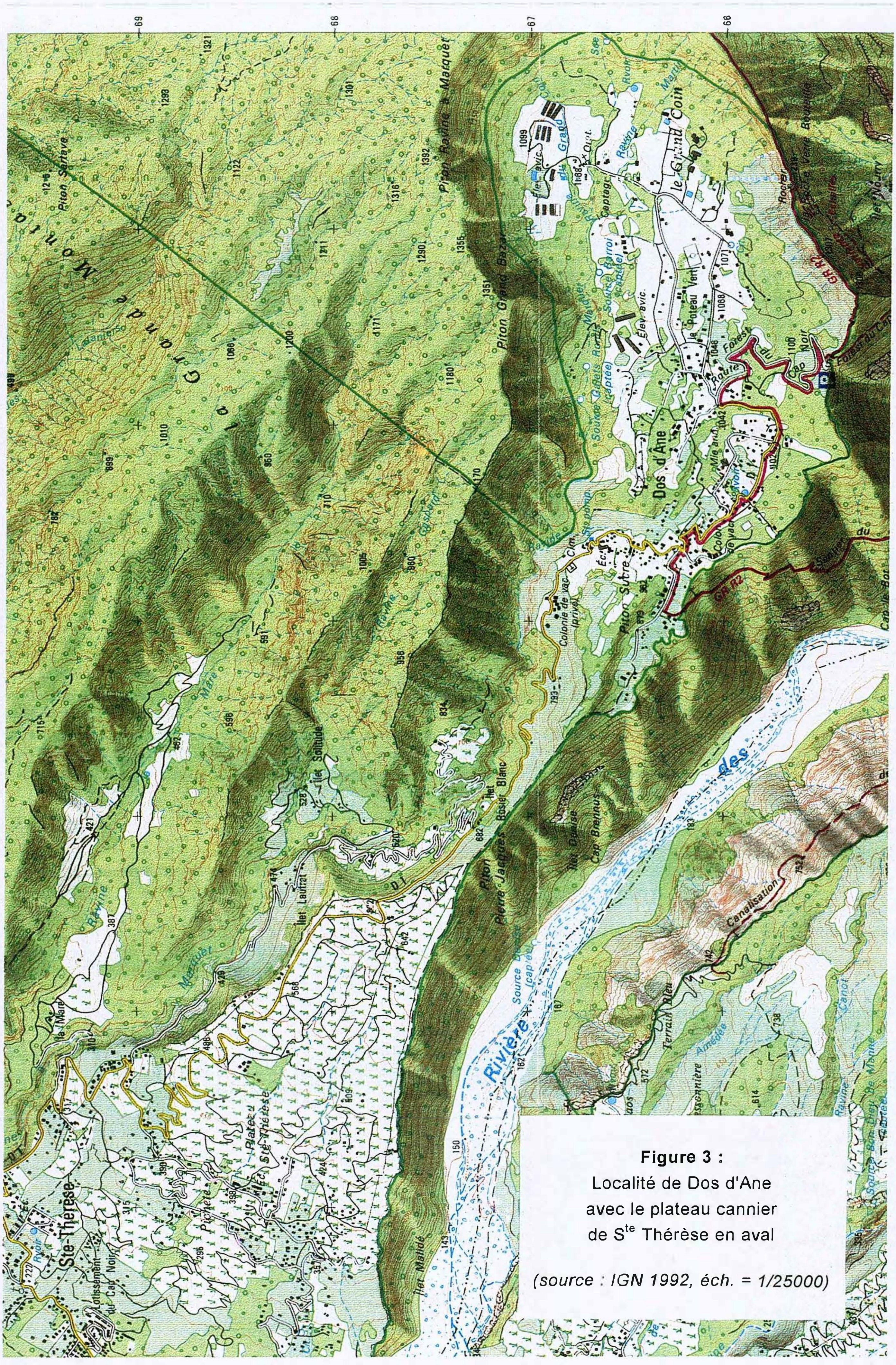


Figure 3 :
Localité de Dos d'Ane
avec le plateau cannier
de Ste Thérèse en aval

(source : IGN 1992, éch. = 1/25000)

IV.1. Etude des pratiques à l'échelle régionale : cirque de Salazie

Après une approche contextuelle de la production agricole dans le cirque, située par rapport aux productions de l'île, l'étude (Reynaud, 1995) s'appuie essentiellement sur des enquêtes réalisées selon la méthode de l'analyse globale de l'exploitation agricole (Caneill *et al.*, 1990 ; Capillon, 1993). Sur l'ensemble du cirque de Salazie, où plus de 15 % de la production hors sol de l'île est réalisée, alors que les possiblités d'utilisation des effluents sont réduites, 38 exploitations ont été enquêtées à partir d'un échantillonnage représentatif des différents systèmes de production et des tailles d'exploitations (aspects structurels).

IV.1.1. Typologie de fonctionnement des exploitations

Trois grands types d'exploitations ont pu être mis en évidence (tableau 1) (Reynaud, 1995) :

- type 1 : hors sol prédominant avec deux sous-types, les entrepreneurs (1B) et les prudents (1A) face à une extension de leur élevage,
- type 2 : coexistence de hors sol et de productions végétales avec deux sous-types, les engagés vers le hors sol (2B) et les diversifiés (2A),
- type 3 : productions végétales prédominantes avec trois sous-types, les traditionnels (3B), les maraîchers volontaristes (3A) et les entrepreneurs en productions végétales (3C).

Tableau 1 : *Présentation des différents types et sous-types d'exploitations de Salazie*

sous-types	1B	1A	2B	2A	3B	3A	3C
truies	20 - 45	15 -30	15 - 25	10 - 20	< 5	5 - 10	non
poulets (m^2)	200 - 1300	200	rarement	rarement	rarement	rarement	rarement
boeuf fumier	non	non	parfois	non	toujours	courant	non
SAU (ha)	0 - 2	0 - 1	1 - 3	3 - 5	2 - 5	2 - 5	> 5
PV	pas ou peu	non	légumes	serres	fourrage	F / L	canne
CFVA	non	non	non	non	< 50%	> 50%	F / L
filières de commercial.	CPPR GM	CPPR GM	CPPR ind marché	CPPR ind marché	marché bazard	marché	marché GMS
investiss.	élevés	faibles	élevés	élevés	nuls	faibles	élevés
MdO	embauche	famille	embauche	famille	entraide	rare	embauche
stratégie	croître dynamique	revenu extérieur	évolution vers 1	équilibre PV / HS	survie	croître dynamique	grosses structures
problèmes	quotas / lisier		saturation du marché		abandon ?	sécurité marché	marché TAA

SAU = surface agricole utile ; PV = productions végétales ; CFVA = cultures à forte valeur ajoutée ;
MdO = main d'oeuvre ; CPPR = coopérative des producteurs de porcs de la Réunion ;
GM = abattoir de volailles Grand Matin ; ind = indépendant ; bazard = vente à un commerçant en fruits et légumes ;
GMS = grande et moyenne surface ; F/L = fruits et légumes ; HS = hors sol ; TAA = transformation agro-alimentaire

Les trajectoires d'évolution (figure 4) montrent que le type 1A peut évoluer vers 2A (retour aux productions végétales) ou vers 1B (investissement). Le type 2A peut évoluer vers 3A (abandon du hors sol), vers 3C (augmentation de la S.A.U.) ou vers 2B (augmentation du hors sol). Le type 2B peut évoluer vers 1A ou 1B selon la diversification du hors sol (poulets et/ou porcs). Le type 3A peut évoluer vers 2A (augmentation du hors sol) ou 3C (augmentation de la S.A.U.). Le type 3B connaît peu d'évolution.

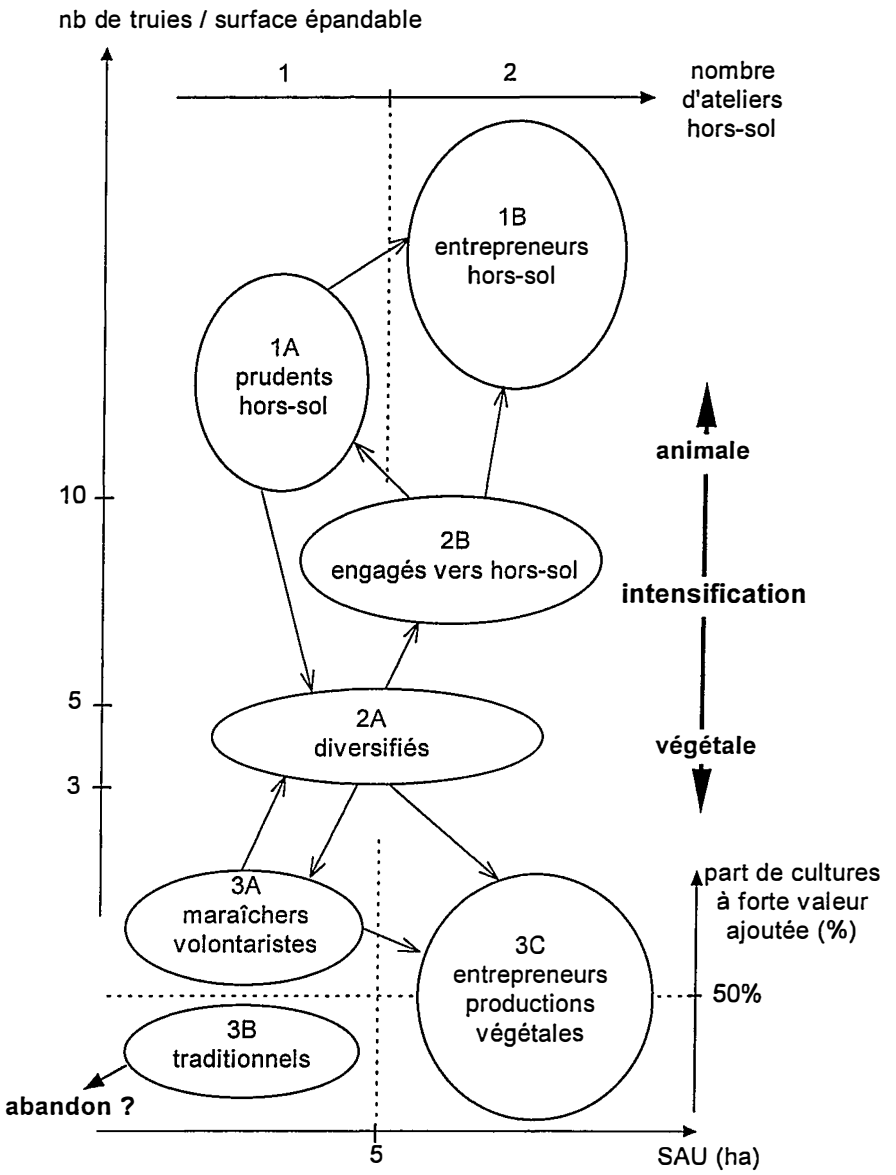


Figure 4 : *Trajectoires d'évolution possibles entre les types d'exploitations*

IV.1.2. Pratiques agricoles de gestion des effluents

Les pratiques ont été analysées en fonction de la typologie réalisée, donc pour chacun des types d'exploitation et aussi selon les différents déchets (litière, fumier, lisier sec, lisier liquide, fientes) plus ou moins bien valorisés (Reynaud, 1995).

Pour les exploitations de type 1 (hors sol), les risques pour l'environnement sont l'épandage sur friches, les doses excessives sur les quelques parcelles cultivées et les pratiques d'épandage "sauvage" (ravines). Pour les exploitations de type 2 (mixtes), le risque se limite aux doses excessives sur les petites surfaces cultivées. Il n'y a aucun risque concernant les exploitations de type 3 (végétal); celles-ci sont même fortement demandeuses de matière organique principalement sèche. Des plans d'épandage du lisier liquide sur canne à sucre seraient souhaitables pour éviter d'éventuels surdosages.

Tableau 2 : *Estimation du cheptel et des quantités d'effluents produites (t) par les différents types d'exploitation de Salazie en 1995*

cheptel	type 1		type 2		type 3		total	
truies	870		320				1190	
lapins (CM)			400				400	
pondeuses	55000							
poulets (m^2)	11340		1320				12660	
boeufs			50		350		400	
effluents produits	tonnes	N (kg)	tonnes	N (kg)	tonnes	N (kg)	tonnes	N (kg)
lisier de porcs liquide	18700	80400	6400	27500			25100	107900
lisier de porcs sec	1400	8400	200	1200			1600	9600
litière de porcs			700	4200			700	4200
lisier de lapins			200	1800			200	1800
lisier de pondeuses	2400	25000					2400	25000
fientes de pondeuses	600	12000					600	12000
litière de volailles	700	18000	200	5100			900	23100
fumier de boeuf			400	1500	2600	10000	3000	11500
compost de déchets	1200	3600					1200	3600
total	25000	147400	8100	41300	2600	10000	35700	198700
part de l'azote produit		(74 %)		(21 %)		(5 %)		(100 %)

Pour la litière de volailles, le lisier sec de porcs produit en faible quantité dans les élevages traditionnels et le fumier de boeuf, aucun problème ne semble se poser (tableau 2). Par contre, pour le lisier liquide de porcs, les épandages réalisés actuellement, sur friches en pente notamment, ne respectent pas la réglementation et ne peuvent donc être des solutions à terme. Il paraît indispensable d'augmenter et d'améliorer les transferts de lisier des exploitations de type 1 et 2 vers celles de type 3. Cependant, le lisier intéresse peu ces derniers agriculteurs car il est difficile a manutentionné ; de plus l'épandage est interdit sur maraîchage et sur terrains trop pentus,. La canne à sucre, quant à elle, ne peut recevoir ce lisier qu'après la coupe, et les distances à parcourir sont souvent importantes (plus de 10 km en montagne). Il faudra donc trouver des solutions de compostage de ce lisier.

Tableau 3 : Besoins des cultures estimés pour l'ensemble du cirque de Salazie

type d'effluent	cultures	surface (ha)	besoins (N ha^{-1})	besoins (kg N)
effluents	maraîchage	160	300	48000
secs	chouchou (plantation)	10	400	4000
	besoin total en effluents secs (litière et lisier secs de porcs, litières de volailles, fumier de bovins, compost de déchets carnés)			52000
effluents	chouchou (entretien)	20	200	4000
liquides	fruits	40	100	4000
ou	canne à sucre	80	150	12000
pâteux	fourrage	120	400	48000
	besoin total en effluents liquides (lisier de porcs, de lapins et de pondeuses, fientes de pondeuses)			68000
besoin total en effluents dans le cirque de Salazie				120000

Les besoins ont été calculés à partir des fiches techniques de la Chambre d'Agriculture et des données C.I.R.A.D.

IV.1.3. Modélisation des flux de matière organique

A partir de la quantification des productions des différents effluents (tableau 2) et des utilisations sur cultures (tableau 3), la modélisation des flux entre les exploitations fait apparaître de nombreux échanges entre les types (Reynaud, 1995). Ces échanges sont spécifiques à chaque déchet. La station de traitement des déchets d'abattoir (Thiery, 1996) a également été intégrée à la modélisation puisque cette activité consomme la moitié de la litière de volailles produite sur le cirque pour fabriquer du compost.

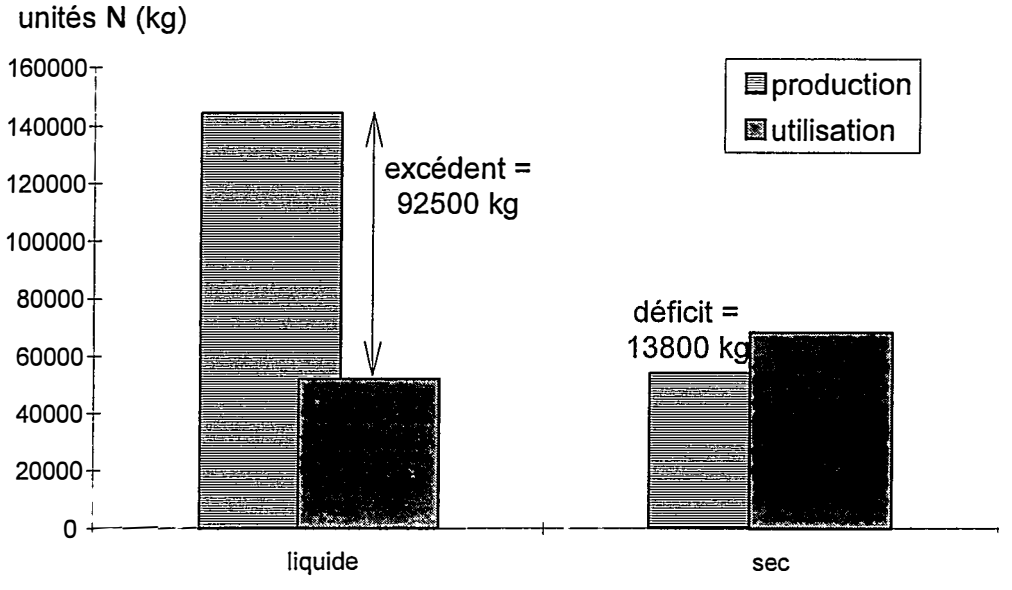


***Figure 5 :** Bilan des flux de matière organique du cirque de Salazie*

Quantifiés en unités fertilisantes ou polluantes (bilan azoté), les effluents secs sont déficitaires de 13800 kg d'azote, alors que les effluents liquides ou pâteux sont en excédent de 92500 kg (figure 5). Globalement le cirque de Salazie présente un excédent de 78700 kg d'azote (soit 40 % de l'azote rejeté par les élevages). Les contraintes énoncées au niveau de l'utilisation de déchets notamment en maraîchage se retrouvent dans ce bilan, à savoir que la fourniture en matière organique épandable (produit sec) est insuffisante, alors que celle d'effluents liquides est en excès. Le compostage d'une partie du lisier ou des fientes de pondeuses serait donc nécessaire pour la fourniture en matière organique valorisable du cirque (équivalent de 6000 m^3 de lisier soit près de 30 % du lisier excédentaire).

Des essais de compostage aérobie sur litière de volailles (Fraboulet *et al.*, 1998) ou bagasse ont déjà été réalisés ou sont en cours en marge de la station de compostage des déchets d'abattoir (Thiery, 1995). La voie anaérobie pourrait également trouver un intérêt pour l'économie de support carboné qu'elle procure (Farinet, 1995). Des procédés d'aération biologique permettraient d'éliminer une partie de l'azote excédentaire par nitrification-dénitrification, sans pour autant apporter de solutions concernant les autres éléments (P et K) qui se retrouvent dans les boues résiduelles qu'il faudra épandre.

Quel que soit le procédé, des transferts de biomasse seront nécessaires pour permettre de limiter les pollutions et valoriser la matière organique hors du cirque, car il reste une part importante de matière organique non valorisable sur place avec les productions végétales actuelles (équivalent de 15000 m^3 de lisier). Ces transferts concerneront l'importation dans le cirque de supports carbonés nécessaires au compostage (paille de canne, bagasse, copeaux ...) et l'exportation de compost vers des zones de cultures extérieures au cirque. En effet, il n'est guère envisageable, compte tenu des difficultés de transport (voirie, enclavement ...), de transporter les produits liquides qui sont trop encombrants. L'étude des coûts de tels transferts, ainsi qu'une analyse de la demande en compost (Farinet, 1995) doivent être réalisées avant la mise en oeuvre de nouveaux procédés de traitement du lisier.

IV.2. Etude des pratiques à l'échelle locale : Dos d'Ane

A l'instar de l'étude du cirque de Salazie (Reynaud, 1995), les flux de matière organique ont été étudiés dans la localité de Dos d'Ane (Paillat *et al.*, 1996). Cette région présente un intérêt pour l'équilibre apparent entre productions végétales (maraîchage) et productions animales (volailles, porcs), et pour sa proximité avec la région cannière de Ste Thérèse, en aval. Elle fait suite à une étude pédo-climatique de la région effectuée en regard de l'impact des pratiques agronomiques sur le périmètre de protection de la source d'eau Edena (Chabalier *et al.*, 1994). De plus, cette région était intéressante à décrire du fait du nombre plus restreint d'exploitations pouvant pratiquer des échanges.

IV.2.1. Typologie de fonctionnement des exploitations

Cette typologie n'est donnée qu'à titre indicatif puisque le nombre d'exploitations est trop faible pour prétendre à cette méthode. Cependant, celle-ci permet de bien se représenter le paysage agricole du site de Dos d'Ane. On distingue trois types d'exploitations :

- le type I pratique essentiellement des productions hors sol (porcs, poulets reproducteurs, poules pondeuses), la distinction en deux sous-types correspond (1A) aux petits producteurs et (1B) à une grosse structure industrielle,
- pour le type II, coexistent des productions hors sol (porcs, lapins), un élevage bovin traditionnel et des productions végétales (maraîchage, surface fourragère),
- le type III représente les maraîchers en production intensive, la distinction en deux sous-types correspond (3A) aux maraîchers exclusifs et (3B) à un maraîcher en cours de diversification vers l'élevage bovin.

Hormis la structure industrielle qui souhaite arrêter son activité sur Dos d'Ane, il est intéressant de noter une évolution de la plupart des exploitations vers le type II en raison des difficultés pour les élevages hors sol, notamment porcins, à écouler le lisier produit, et de celles pour les maraîchers à se procurer de la matière organique adaptée aux cultures maraîchères régulièrement et en quantité suffisante (figure 6).

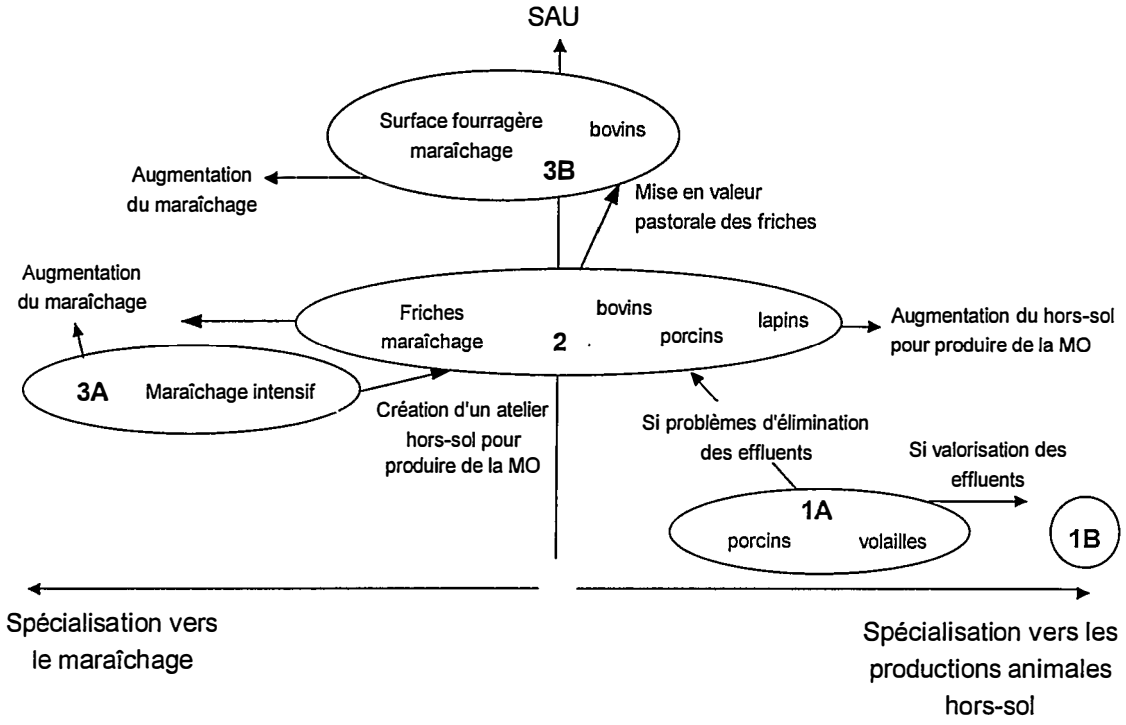


Figure 6 : *Spécialisation des exploitations et trajectoires d'évolution*

IV.2.2. Pratiques de gestion de la matière organique (tableau 4)

Les élevages porcins (type I) écoulent leur lisier de trois façons distinctes :
- épandage sur les terrains cultivés dans l'exploitation (petites parcelles de culture) ou sur friches,
- tentative de compostage en mélangeant le lisier à de la bagasse dans l'exploitation ou dans les exploitations maraîchères utilisatrices,
- épandage sur les terres à canne à sucre du plateau de Ste Thérèse situé à 5 km.

Pour les petits élevages hors sol (type I), les litières de volailles sont utilisées par les maraîchers de la localité. Par contre, les litières de la structure industrielle sont prises en charge par les ouvriers (avantage en nature) et sont valorisées localement (jardins familiaux, petites parcelles de maraîchage) ou le plus vraisemblablement en dehors de la localité.

Les exploitations de type II épandent les déchets d'élevage produits sur les parcelles de maraîchage. Les exploitations de type III achètent de la matière organique dans la localité ou à l'extérieur. Des tentatives de compostage de lisier avec de la bagasse existent également pour ces deux types.

Tableau n° 4 : *Estimation des quantités d'éléments fertilisants produites en 1995 par les élevages de Dos d'Ane suivant le mode de valorisation*

	Quantités (m^3)	N (kg)	P_2O_5 (kg)	K_2O (kg)	CaO (kg)	MgO (kg)
Lisier de porcs (6% MS)*	*1*	*2.6*	*4.0*	*1.7*	*3.3*	*0.8*
Compostage*** dans les élevages	50	130	200	85	165	40
Epandage sur terres incultes	150	390	600	255	495	120
Compostage*** par les maraîchers	300	780	1200	510	990	240
Epandage sur terres à cannes	700	1820	2800	1190	2310	560
Total lisier de porcs	1200	3120	4800	2040	3960	960
*Litière de volailles (400 kg m^{-3} **)*	*1*	*6.1*	*7.9*	*5.5*	*23.0*	*2.0*
Utilisée par les maraîchers enquêtés	375	2287	2962	2062	8625	750
Autres destinations non contrôlées	3125	19063	24688	17188	71875	6250
Total litière de volailles	3500	21350	27650	19250	80500	7000
Fumier de bovins (500 kg m^{-3})	*1*	*2.4*	*1.2*	*3.5*	*1.8*	*0.5*
Utilisé dans la localité	65	156	78	227	117	33
Fumier de lapins (800 kg m^{-3})	*1*	*5.7*	*13.0*	*7.2*	*13.4*	*3.4*
Utilisé dans la localité	30	171	390	216	402	102
TOTAL des déchets produits	4795	24797	32918	21733	84979	8095

Les valeurs fertilisantes utilisées sont issues du document "Engrais de ferme" (Ziegler et al., 1991).

Pour la Réunion, les données du laboratoire d'analyses CIRAD sont trop variables et insuffisamment nombreuses pour être utilisées.

** teneur moyenne mesurée sur les lisiers de porcs à La Réunion*

*** la litière des reproducteurs et poules pondeuses est plus dense (présence toute l'année et renouvellement seulement 2 fois par an) qu'une litière de poulets de chairs*

**** le terme de compostage est impropre dans ce cas, car il s'agit seulement d'un mélange de lisier et de bagasse, sans contrôle de la phase thermophile et de la maturation*

IV.2.3. Bilan des flux de matières organiques

Le bilan a été approché de deux manières complémentaires. Tout d'abord à partir des apports et des besoins des 10 exploitations maraîchères principales et ensuite globalement au niveau de la région. Par rapport aux recommandations du S.U.A.D., le bilan de fertilisation organique et minérale des exploitations maraîchères (tableau 5) fait apparaître un léger déficit en azote (70 % des besoins), un léger excédent en phosphore (120 % des besoins) et un fort déficit en potasse (45 % des besoins). Un excès important est constaté en calcium en raison de l'utilisation importante de litière de volailles. La fertilisation en magnésium est équilibrée. Cependant ce bilan global cache de grandes disparités entre les exploitations : les excès ou déficits sont fréquents provoquant d'importants déséquilibres en éléments minéraux, les engrais chimiques n'étant pas du tout raisonnés en fonction des apports organiques.

Tableau n° 5 : *Bilan de fumure des exploitations maraîchères enquêtées (10)*

	quantités	N (kg)	P_2O_5 (kg)	K_2O (kg)	CaO (kg)	MgO (kg)
Apports de fertilisants						
Magaline®	11 m^3	40	55	55	105	80
Fumier de bovins	225 m^3	540	280	785	395	115
Litière de volailles	375 m^3	2290	2950	2070	8645	740
Fientes de lapins	30 m^3	170	390	215	400	100
Mélange lisier-bagasse	260 m^3	1010	1510	670	1310	335
Ecume	50 m^3	175	180	40	335	65
Bagasse	400 m^3	90	25	50	100	35
Amendements organiques	1350 m^3	4315	5390	3885	11290	1470
Engrais Minéraux	13.8 t	1555	2550	2640		
Total fertilisants apportés		5870	7940	6525	11290	1470
Besoins des cultures						
Engrais minéraux	37.8 t	4440	4825	10375		
Amendements organiques	1075 m^3	2800	1775	4005	2930	1390
Total des besoins		7240	6600	14380	2930	1390
Soldes de fertilisation						
Engrais minéraux	-24 t	-2885	-2275	-7735		
Amendements organiques	+275 m^3	+1515	+3615	-120	+8360	+80
Soldes globaux		-1370	+1340	-7855	+8360	+80
Soldes par cycle par ha		-30	+30	-165	+175	-2

Au niveau de la localité (tableau 6), excepté pour la potasse, tous les éléments fertilisants sont en excès. Il demeure paradoxal de constater des importations de matière organique et d'engrais non adaptés, alors que la région est globalement excédentaire. Les risques sont une fertilisation déséquilibrée dans la plupart des exploitations et une pollution par lessivage lié à une surfertilisation des terres marginales ou par ruissellement dans les ravines.

Tableau n° 6 : *Bilan des flux d'éléments fertilisants dans la localité de Dos d'Ane*

	quantités	N (kg)	P_2O_5 (kg)	K_2O (kg)	CaO (kg)	MgO (kg)
Production de MO*	4795 m^3	24800	32920	21735	84980	8095
Importation de MO	1021 m^3	780	475	750	935	295
Importation de minéraux	13.8 t	1550	2550	2640		
Total des intrants	(a)	27130	35945	25125	85915	8390
Epandage sur canne (15 ha)	700 m^3	1820	2800	1190	2310	560
MO utilisée en maraîchage	1350 m^3	4320	5390	3885	11290	1470
Minéraux utilisés	13.8 t	1550	2550	2640		
Utilisation contrôlée (25 ha)	(b)	7690	10740	7715	13600	2030
Soldes de fertilisation *(tab. 5)*	(c)	-1370	+1340	-7855	+8360	+80
Utilisation non contrôlée (15 ha)	(d)	1500	1200	2200	900	500
Jardins familiaux (5 ha)**	(e)	4000	3500	7000	1500	1000
Disponible en excès	= a-bcde	12570	21845	355	78275	4940

** matière organique ; ** hypothèse qui mériterait vérification dans la mesure du possible*

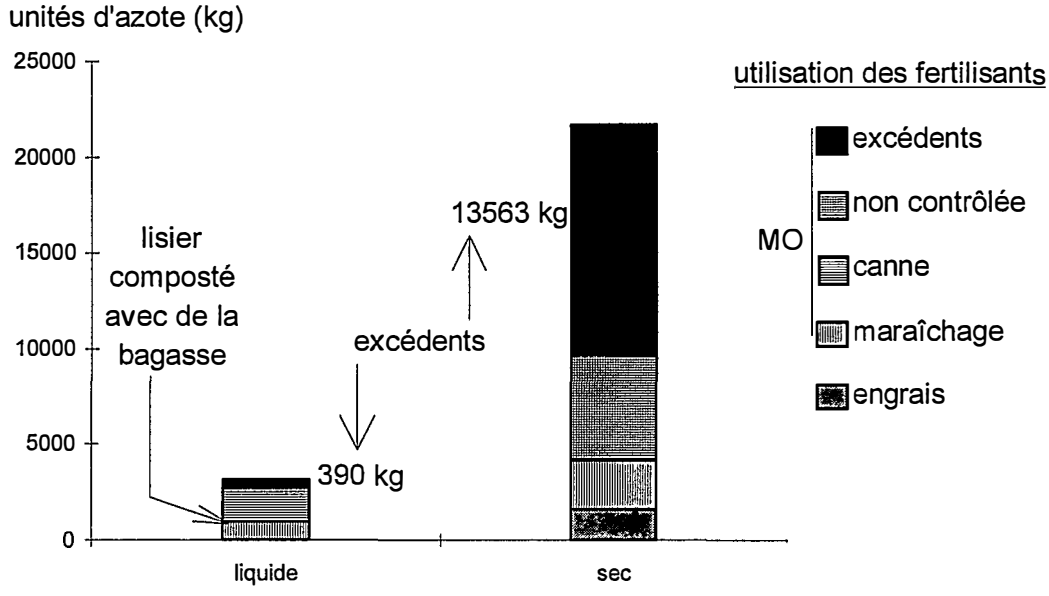


Figure 6 : *Bilan des flux de fertilisants de la localité de Dos d'Ane*

Le déficit en matière organique n'est donc pas tel que les maraîchers l'ont laissé entendre. L'impression de manque de MO[9] que ceux-ci ressentent provient du détournement des litières de volailles de la structure industrielle de l'utilisation agricole locale. De plus, la non adéquation entre le lisier de porcs et les productions maraîchères obligent actuellement à une valorisation en zone canne hors de la localité. Comme pour le site de Grand-Ilet à Salazie (Reynaud, 1995), une solution par un compostage maîtrisé devra être trouvée pour valoriser davantage les lisiers de porcs. Le circuit de litière de volailles étant très difficilement contrôlable et dans la perspective de l'arrêt d'activité de la structure industrielle dans la zone, un apport de support carboné (bagasse, paille de canne, copeaux) pour le compostage semble nécessaire.

IV.3. Etudes des pratiques à l'échelle de l'exploitation : région des Hauts de l'Ouest

Depuis plusieurs années, le CIRAD conduit des actions sur le thème de la fertilité dans les exploitations des Hauts, avec plusieurs objectifs : proposer des systèmes viables et durables en terme de conservation des sols, acquérir des références sur les systèmes de production et valider les solutions proposées, comprendre les pratiques et concevoir des outils d'aide à la décision pour les agriculteurs. L'étude de L. Vimeux (1998) s'inscrit dans ce dernier objectif.

Dans les Hauts de l'Ouest, la diversification par rapport aux cultures traditionnelles (canne à sucre, géranium) constitue un facteur de viabilité économique des exploitations (Boscher *et al.*, 1996). Cependant, cette diversification nécessite des apports de MO pour maintenir, voire restaurer la fertilité des sols dégradée par la monoculture du géranium. La durabilité écologique et économique des exploitations dépend donc de la possibilité de mobilisation de matières organiques. Les horticulteurs ont recours à l'achat de MO à l'extérieur (écume, litière de volaille, fumier de bovins ...) et pour certains, à la production de fumier de bovins.

L'étude s'intéresse à la diversité des situations de gestion de la MO. Les fonctions de production de MO sur l'exploitation, d'approvisionnement à l'extérieur, d'allocation sur les parcelles et les cultures sont décrites. Un cadre de représentation cette gestion est proposé.

IV.3.1. Démarche et méthodologie

Dans la définition d'un cadre de représentation de la gestion de la MO, différents niveaux sont distingués : les logiques de prises de décisions stratégiques (pluriannuelles), la planification annuelle de l'utilisation de la MO et les éléments de décision concernant les pratiques d'apport. Neuf exploitations ont été retenues pour leur diversité quant à la présence ou non de cultures "pivot" telles que la canne à sucre ou le géranium, la présence ou non d'une retenue collinaire pour l'irrigation des cultures, la présence ou non d'animaux sur l'exploitation et les cultures horticoles pratiquées. Différents aspects de l'exploitation ont été abordés lors des enquêtes : l'historique, le relevé du parcellaire, l'établissement de calendriers culturaux, les pratiques de fertilisation minérale et organique.

---

[9] matière organique

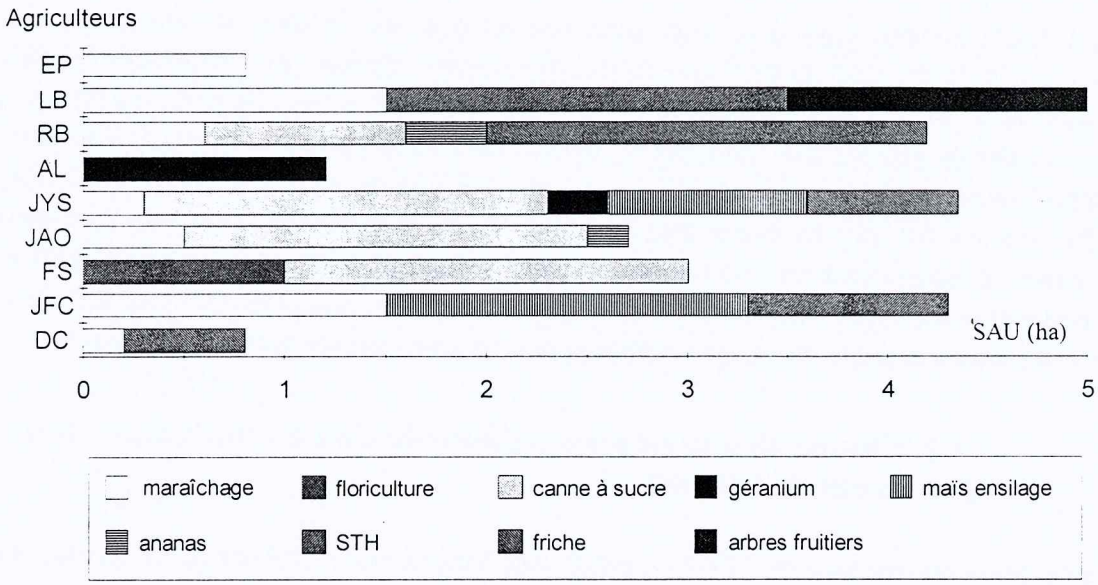


Figure 7 : *Mise en valeur de la SAU dans les exploitations suivies (source : Vimeux, 1998)*

IV.3.2. Caractérisation de l'équilibre demande / offre en matière organique au sein des exploitations

Cet équilibre dépend de plusieurs déterminants : la perception de la MO par les agriculteurs, l'élaboration de la demande des cultures, la contribution de l'offre interne à l'exploitation et la capacité d'approvisionnement à l'extérieur. Ces facteurs déterminent ainsi des niveaux différents de contraintes (autosuffisance et approvisionnement) selon les exploitations enquêtées.

En ce qui concerne la perception de l'agriculteur, la MO a pour tous un rôle d'alimentation des plantes. Certains évoquent un rôle d'amendement et de structuration du sol. Cependant, comme pour les agriculteurs de Dos d'Ane (Paillat *et al.*, 1996) la valeur fertilisante de cette MO n'est pas connue quantitativement. Elle n'est donc pas raisonnée par rapport aux besoins en fertilisants. En fait, c'est le type de culture qui détermine qualitativement les apports : certaines sont qualifiées d'exigeantes (tomates, pomme de terre, choux, salades, citrouilles, oignon, cultures florales, cultures semi-pérennes et pérennes), d'autres le sont peu (pois, haricots, maïs, brèdes[10], piment, aubergines ...).

Ensuite, la demande s'élabore au sein de chaque exploitation selon la disponibilité en eau, premier facteur d'intensification, la rotation (l'apport de MO peut être raisonné sur plusieurs cultures, par exemple une culture exigeante amendée suivie d'une culture peu exigeante sans apports) et l'assolement, c'est à dire les surfaces respectives de chacune des cultures selon leur degré d'exigence.

---

[10] jeunes pousses herbacées de diverses plantes, consommées bouillies

Enfin, l'offre interne en MO répond à différentes stratégies selon les exploitations. Ceux (les plus nombreux) qui ont choisi d'élever des animaux évoquent la constitution d'un capital sur pied, le gain financier, le coût moins élevé d'obtention de la MO et la moindre dépendance vis à vis de l'extérieur. L'agriculteur ayant fait le choix inverse, le justifie par la trop grande quantité de MO nécessaire dans son système de cultures, qu'un petit élevage ne pourra pas couvrir, et par le peu de main d'oeuvre disponible pour s'occuper d'un atelier de production animale. Grâce aux mesures financières dans le cadre de l'O.G.A.F.[11], la plupart des agriculteurs ont pu mettre en place un petit atelier de production animale constitué de quelques ruminants (bovins et caprins) et de volailles pour un cas.

Par rapport à la contrainte demande / disponibilité en MO produite, plus au moins intense selon les cas (peu d'agriculteurs sont autosuffisants en MO), les agriculteurs mettent en oeuvre des adaptations constituées principalement par la recherche d'un approvisionnement en MO. La contrainte "autosuffisance" fait place ainsi à une contrainte "approvisionnement". Sur ce plan également, les exploitations suivies sont dans des conditions très différentes, en rapport avec la trésorerie mobilisable pour l'achat de MO ou avec la possibilité d'un approvisionnement gratuit, à prix modéré ou moyennant une compensation en main d'oeuvre pour le nettoyage des bâtiments d'élevage (famille, connaissance). Certains prévoient systématiquement des achats en une ou deux fois par an, d'autres y ont recours occasionnellement selon les opportunités. Les matières organiques provenant de l'extérieur sont de différentes natures : écumes de sucrerie, litière de volailles, lisier de lapins, lisier sec de bovins (étable raclée).

IV.3.3. Gestion de la matière organique

Au niveau spatial, on observe des différences notables entre les exploitations. La MO produite sur l'exploitation est localisée près de l'atelier de production animale, lui-même proche de la maison d'habitation (sauf si l'agriculteur juge que le vol d'animaux sur ses parcelles est peu probable) et donc quelquefois loin des parcelles. La localisation de la MO provenant de l'extérieur dépend des accès à l'exploitation et aux parcelles. Parfois, la reprise du tas est nécessaire en période favorable pour l'accès aux parcelles (sans pluie).

La contrainte demande / offre a des conséquences en matière de gestion de la MO dans la rotation et l'assolement : limitation des surfaces, allocation à certaines cultures, choix de cultures rustiques, organisation des successions culturales. "La coordination entre assolement et MO se fait de façon bien tranchée. L'objectif d'assolement (surfaces et cultures définit un besoin en MO, en volume et périodicité. Ce n'est que lorsque l'offre globale est connue qu'un réajustement sur la surface peut s'opérer, dès lors que l'agriculteur a également pris en compte les aspects eau, trésorerie, main d'oeuvre ..." (Vimeux, 1998).

---

[11] Opération Généralisée d'Aménagement Foncier : dans ce cadre, une subvention d'investissement est accordée pour la constitution d'un élevage en vue de produire du fumier.

IV.3.4. Règles de planification des apports et ajustements

Trois catégories de règles sont mobilisées pour l'utilisation de la MO : gestion des apports par cycle cultural selon quelques critères principaux, ajustements de cette gestion selon la contrainte "MO disponible" et reconstitution du stock de MO.

Les apports sont gérés selon la nature de la culture à implanter, la qualité de la MO perçue par l'agriculteur (tableau 7), la durée du cycle de production, l'interaction avec les engrais (certains pratiquent des apports d'engrais minéraux systématiques, d'autres privilégient les apports de MO et éventuellement des apports raisonnés d'engrais minéraux), et le stock de MO disponible.

Tableau 7 : *Richesse et qualités des matières organiques selon la perception des agriculteurs des Hauts de l'Ouest (source : Vimeux, 1998)*

Type de MO	perception des agriculteurs
litière de volailles	décomposition longue, notamment en hiver plus fort que le fumier de bovins riche en azote
fumier de bovins	bon fumier, le meilleur, souple, moins acide riche en humus retient bien l'humidité, bon développement racinaire
fumier de caprins	fumier correct, bon pour toutes les cultures plus fort que le fumier de bovins peut être dangereux pour les plantes
lisier de lapins	très fort
écumes de sucrerie	bonne matière organique riche en potasse, pouvoir chaulant, pH alcalin trop sèches : à mélanger avec du fumier de bovins

Les ajustements à ces apports sont effectués de différentes façons : par la quantité apportée, par priorité d'allocation ou par impasse, par changement du mode d'apport, par substitution entre types de MO, par la recherche d'une solution de secours à l'extérieur.

La reconstitution du stock fait appel à des règles de stockage dépendant du rythme de nettoyage des bâtiments d'élevage pour ceux qui ont un atelier d'élevage ou qui ont "contractualisé" avec un éleveur (volailles notamment). Pour les achats à l'extérieur, notamment les écumes de sucreries, le stockage est effectué généralement en fin de campagne sucrière.

IV.4. Conclusion et poursuite des travaux sur l'analyse des pratiques

L'analyse des pratiques nous a permis de mettre en évidence différents aspects de la gestion des effluents d'élevage à la Réunion.

1- Les risques en matière d'environnement sont étroitement associés aux types d'exploitation. En cela, la typologie proposée pour Salazie (Reynaud, 1995) et adaptée pour Dos d'Ane (Paillat *et al.*, 1996) est intéressante et renseigne sur la nature et l'importance des échanges de MO nécessaires pour assurer des transferts de fertilité entre exploitations ou entre localités.

2- Les trajectoires d'évolution des exploitations rendent compte d'une volonté d'intensification des systèmes de production pour des raisons de viabilité économique. Cette intensification se raisonne soit vers l'élevage hors sol soit vers le maraîchage. Dans le même temps, cette volonté est contrariée par la difficulté à écouler les matières organiques produites (notamment le lisier de porc) pour les uns et par la contrainte d'approvisionnement en MO de qualité pour les autres (maraîchage).

3- La gestion de la MO intervient ainsi à différentes échelles (parcelles, exploitations, localités, régions). La résolution des problèmes de gestion des effluents à chacune de ces échelles dépendra donc des acteurs intervenant et de leurs relations entre eux : gestion individuelle aux échelles de la parcelle et de l'exploitation, gestion collective aux échelles locale et régionale. Un travail méthodologique (analyses, modélisation) sera nécessaire pour appréhender le passage de l'individuel au collectif.

4- Des bilans de matières sont estimables à chacune des échelles retenues. Cependant, les matières organiques doivent être différenciées selon leur nature, en relation avec les facilités d'emploi et l'utilisation par les cultures. Un bilan en terme de circuit sec et circuit liquide a été proposé pour l'échelle régionale (Reynaud, 1995). Pour la localité, on peut aborder plus facilement le bilan par produit, voire par unités fertilisantes, si l'analyse des pratiques culturales le permet (Paillat *et al.*, 1996). Pour les exploitations, le bilan en terme d'utilisation selon les stratégies et représentations des agriculteurs est important (Vimeux, 1998). Enfin, au niveau des parcelles le diagnostic de fertilité (analyse de sols) et le bilan de fertilisation (unités) deviennent nécessaires.

L'analyse des pratiques de gestion des effluents sera complétée en 1998 par l'étude de l'élevage laitier sur ce thème. En effet, celui-ci ne pose *a priori* pas de problème de pollution, les risques sont, semble-t-il, limités car le pâturage et les surfaces fourragères intensives permettent de valoriser les déjections de l'élevage. Cependant, on observe depuis quelques années une forte intensification des systèmes laitiers (Delattre, 1996 ; Fontaine, 1997) basée sur l'achat d'aliments grossiers en zone canne (foin, paille de canne, bagasse) et une complémentation en aliments concentrés élevée. Le rapport quantité d'effluents sur surface épandable s'accroît rapidement (chargement supérieur à 5 UGB par ha). Des problèmes sont déjà clairement identifiés dans les zones où l'épandage est limité et difficile (Plaine des Grègues). Une autre question se pose aux élevages laitiers : comment valoriser les fumiers sur les surfaces fourragères ? Jusqu'à présent, en l'absence de paillage sous les animaux, les élevages laitiers produisaient du lisier. Avec la récolte possible de la paille de canne, certains éleveurs, pour des raisons de confort des animaux notamment en hiver, paillent les étables. Le fumier produit est alors difficilement épandable (décomposition lente) sur les pairies qui sont pâturées ou fauchées toute l'année. Une transformation en compost pourrait s'avérer nécessaire.

V. Modélisation des flux

V.1. Modélisation à différentes échelles

S'agissant de la gestion des flux de matière organique, une esquisse d'action de recherche a été proposée (D'Aquino, 1996). Celle-ci a fait apparaître la nécessité de travailler à différentes échelles et de représenter les pratiques des différents acteurs (éleveurs, maraîchers, transformateurs, transporteurs ...) intervenant dans la gestion des matières organiques.

Plusieurs questions de recherche sont posées :
- Comment représenter en une typologie fonctionnelle pour le développement, la diversité des pratiques agricoles en matière de gestion des déchets ?
- Quelles sont les adéquations possibles entre l'offre de déchets et la demande en matière organique ?
- Quelles sont les échelles pertinentes pour appréhender les bilans de matière organique afin de mieux réfléchir à des scénarios de gestion spatialisés ? Comment extrapoler les résultats d'une échelle à l'autre ?

V.1.1. Représenter la diversité des pratiques

Les principales conclusions des études réalisées à Salazie, Dos d'Ane et dans les Hauts de l'Ouest sont que de nombreux échanges de matière organique existent entre exploitations et avec l'extérieur de la localité. Ces échanges sont différenciés selon la nature des déchets. D'une façon générale, la fourniture en matière organique solide est déficitaire, alors que les effluents liquides sont excédentaires. Une volonté de gestion des effluents doit donc prendre en compte cette variété de gisements avec leurs problèmes spécifiques, notamment pour le traitement des effluents liquides qui nécessiteront des supports carbonés déficitaires en zone d'élevage.

Face à ces constats, l'échelle de référence consiste au choix d'une discontinuité dans un processus. Dans le cas de la gestion des déchets, la discontinuité spatiale importante est le coût du transport. Il faut repérer les points où les coûts de transport subissent des sauts importants. Il est vraisemblable, mais cela reste à confirmer, que les coûts varient de façon importante lors des transferts hors exploitation. De même, un palier doit être observé lors des transferts hors de la localité (Grand-Ilet, Dos d'Ane). La modification des coûts à l'échelle de la région vers la zone côtière doit être moins marquée. Les deux échelles qui peuvent être retenues pour l'analyse des flux seraient donc l'exploitation et la localité. Une troisième échelle pourrait également être repérée à l'intérieur de l'exploitation (état des chemins ruraux, éloignement et topographie des parcelles). La représentation des flux à ces différentes échelles permettra de cibler les seuils et contraintes au développement de la filière "effluents d'élevage", d'effectuer des bilans différenciés selon les produits en jeu. Cette représentation pourra être réalisée avec l'aide de logiciels de modélisation systémique.

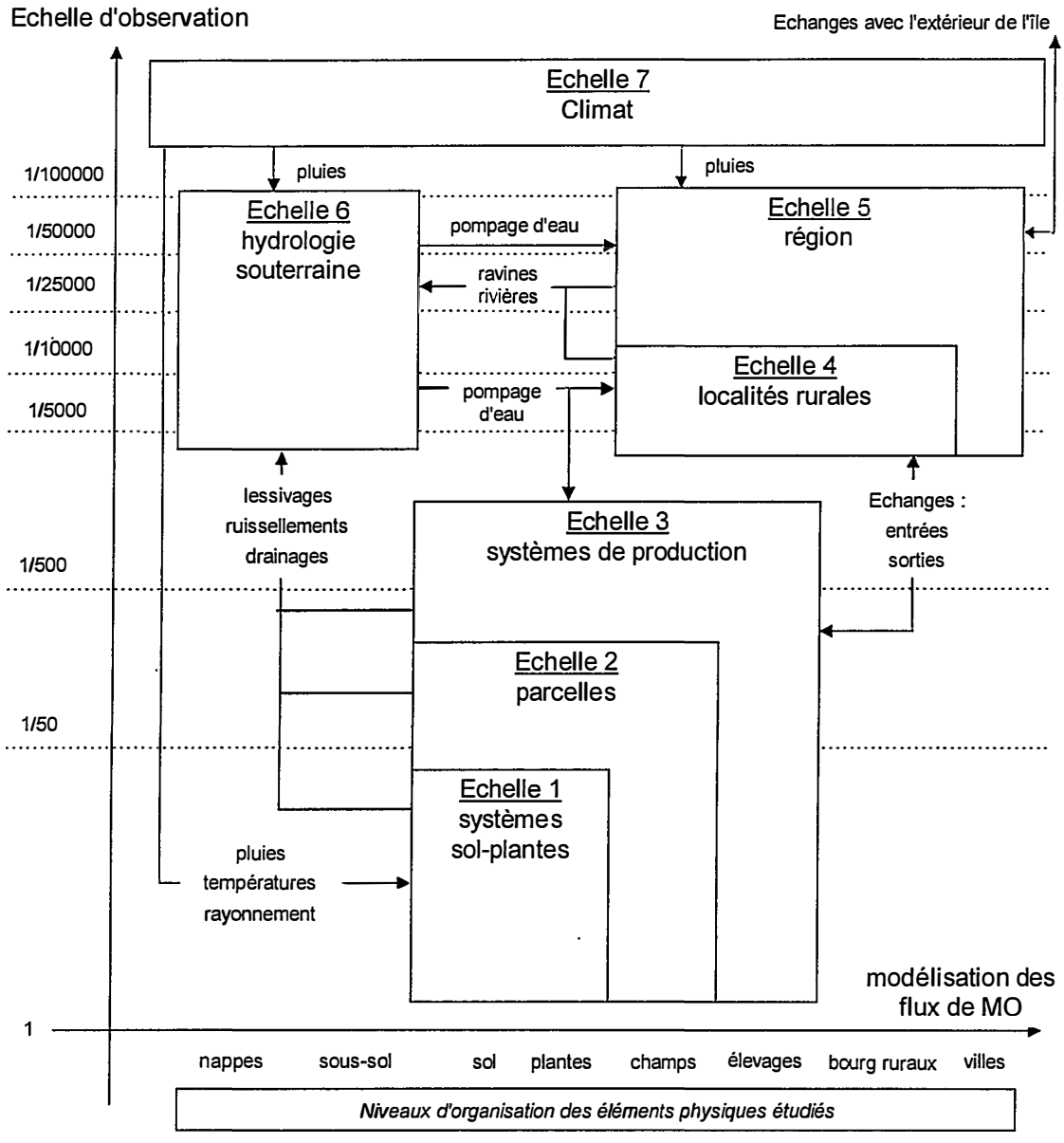


Figure 8 : *Représentation des différentes échelles de gestion des flux de matière organique*

Les flux des différents types de matières organiques peuvent être différenciés schématiquement en 3 grands niveaux d'échelles interconnectés (figure 8) :

- celui qui concerne l'exploitation agricole (échelles 1, 2 et 3), centre de décision unique (système mono-acteur) qui peut se raisonner à l'échelle 1 (figure 9) du système sol-plante (valorisation de la matière organique, lessivage), à l'échelle 2 (figure 10) des parcelles (cultures, érosion, ruissellement) et à l'échelle 3 (figure 11) du système de production (productions végétales, élevages, friches, chemins d'exploitation, ravines),
- celui qui concerne les relations entre différents acteurs (échelles 4 et 5), décideurs multiples (système multi-agents) à différents niveaux d'organisation collective (groupements d'exploitation, localités rurales, région) (figures 12 et 13),
- celui qui concerne l'écosystème insulaire (échelles 6 et 7) avec les connections entre climat, hydrogéologie, hydrologie souterraine et pollutions diverses, notamment celles liées aux pratiques agricoles.

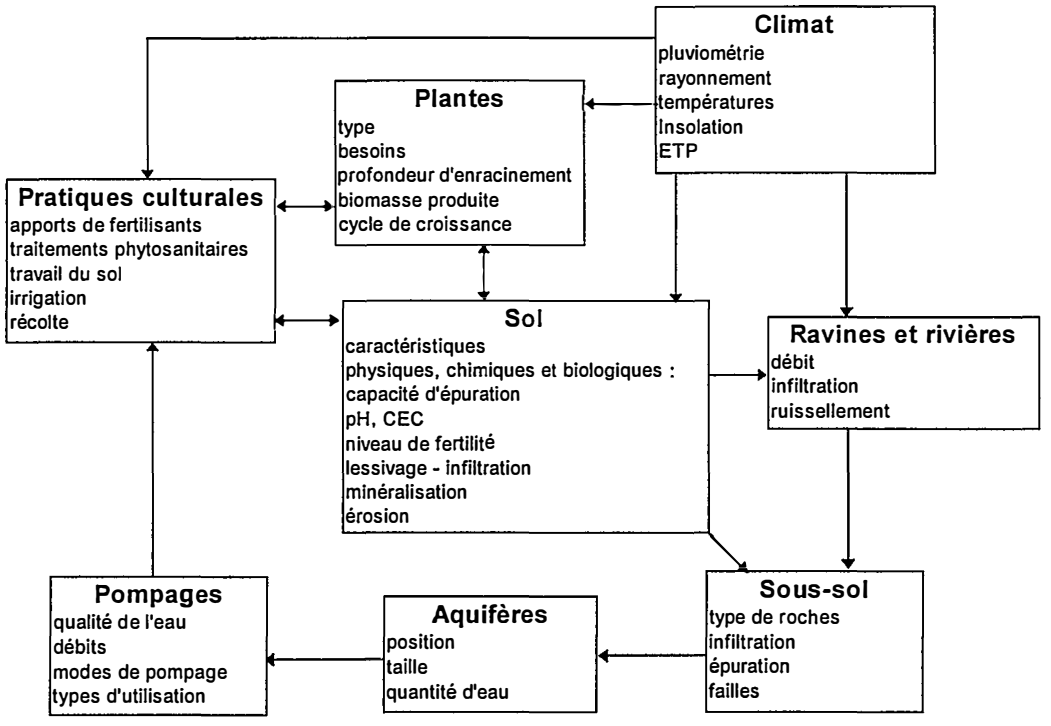


Figure 9 : *Représentation des flux à l'échelle du système sol-plante*

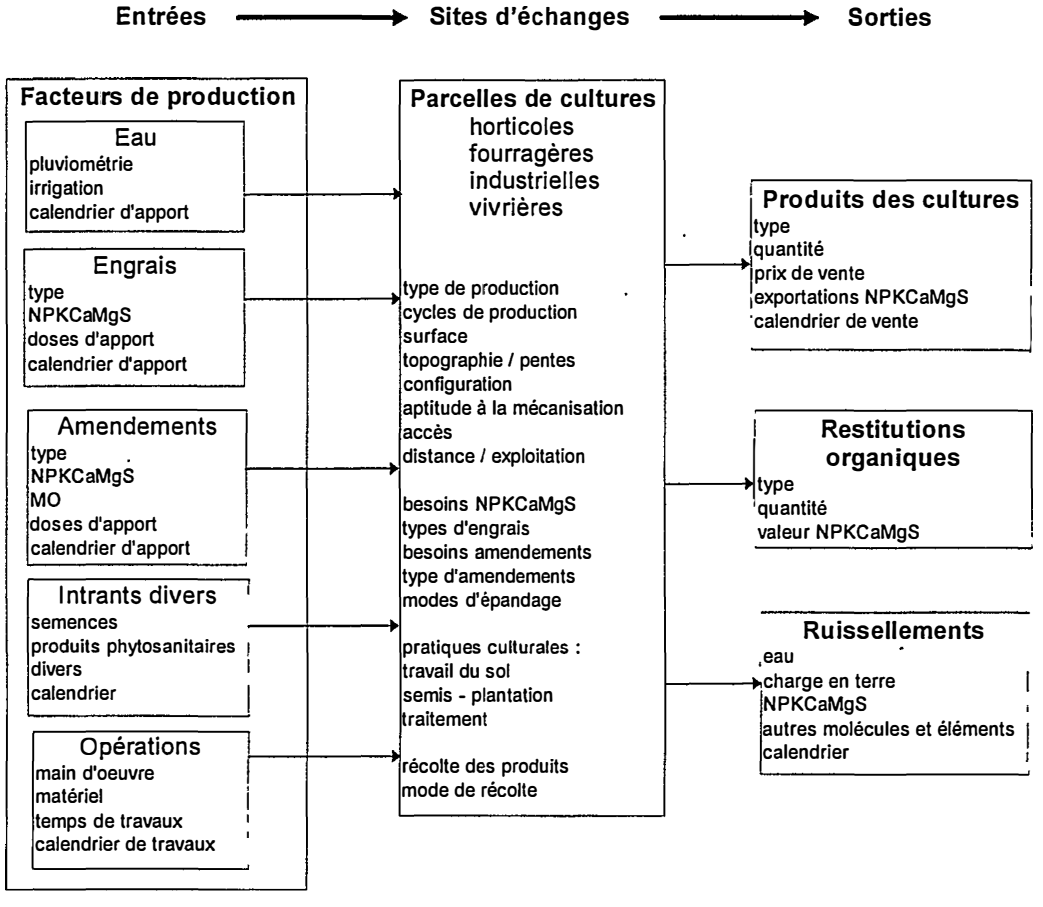


Figure 10 : *Représentation des flux à l'échelle parcellaire*

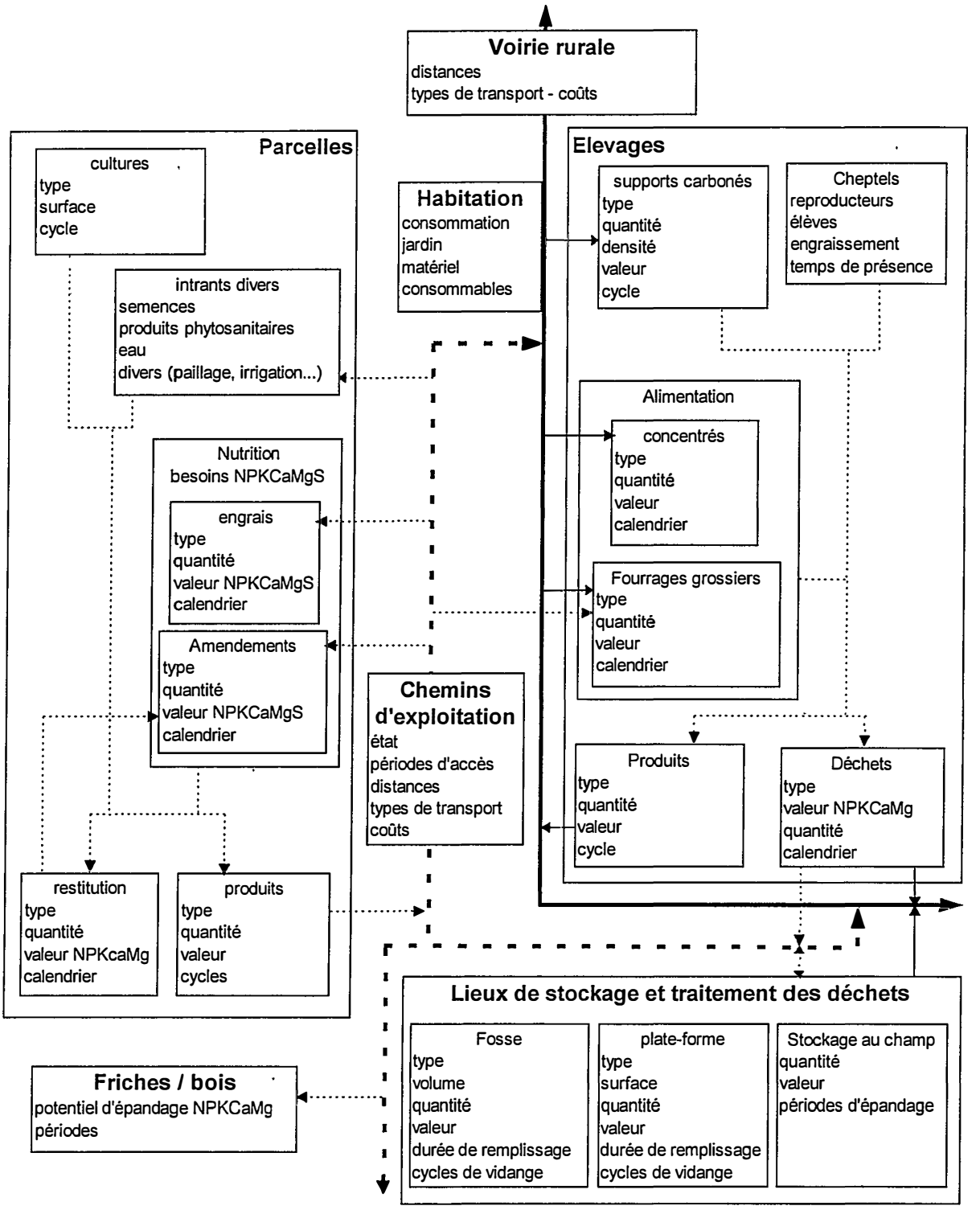


Figure 11 : *Représentation des flux à l'échelle de l'exploitation agricole (traits pleins = voirie rurale bitumée, traits pointillés = chemins d'exploitations)*

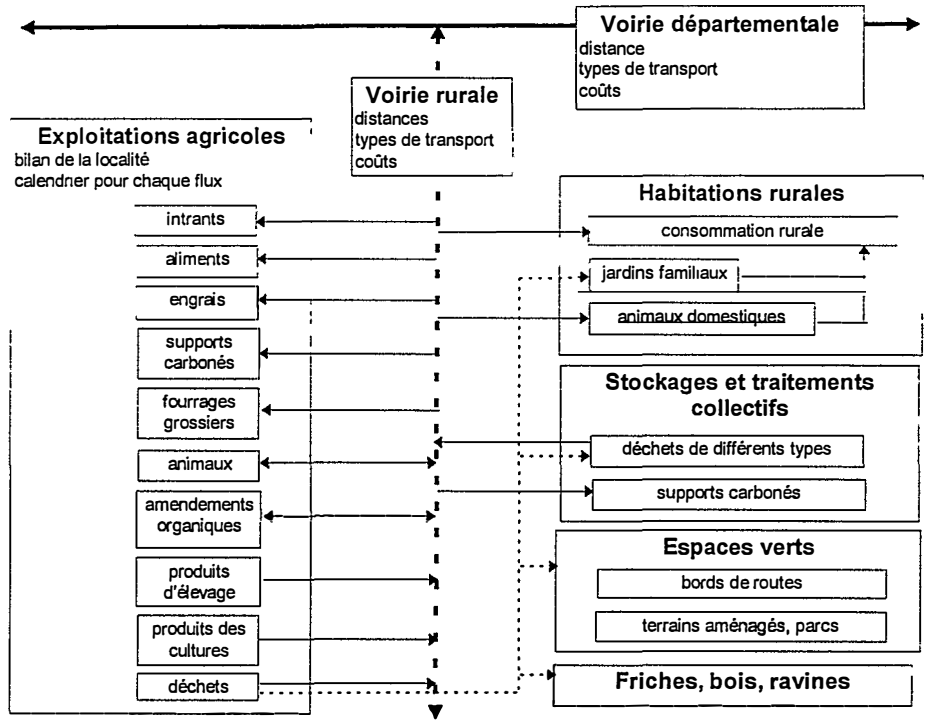


Figure 12 : *Représentation des flux à l'échelle d'une localité (entrées - échanges - sorties)*

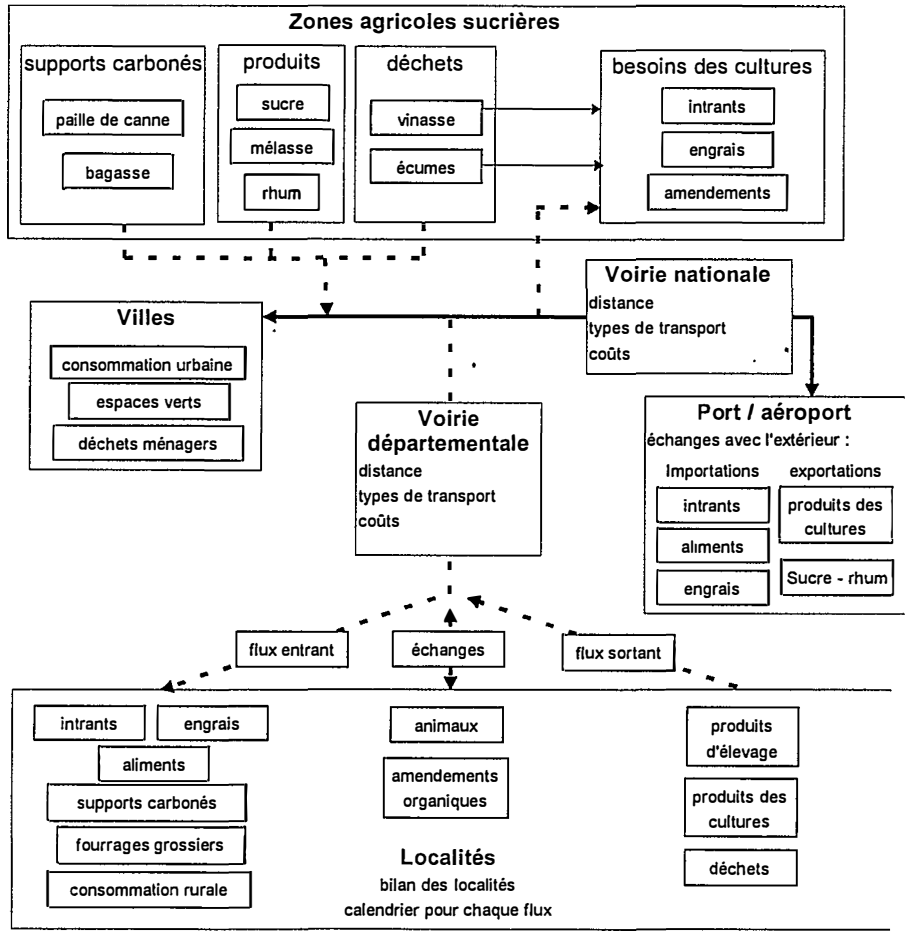


Figure 13 : *Représentation des flux à l'échelle régionale et de l'île*

V.1.2. Modéliser des scénarios de gestion

La prise en compte du coût économique des différentes étapes de la filière nécessitera d'intégrer des paramètres spatiaux tels que la topographie, la qualité de la voirie, les surfaces d'épandages ... Les différentes localisations envisageables des plates-formes intermédiaires (chargement, conditionnement, traitement, stockage ...) devront servir de base à des scénarios d'organisation de la filière.

L'intégration de l'espace permettra d'évaluer les coûts en investissements et fonctionnement de ces différents scénarios. L'utilisation d'un système d'information géographique sera nécessaire (i) comme outil de stockage et de gestion des informations cartographiables (développement), (ii) comme outil de modélisation et d'optimisation des organisations et structurations spatiales (recherche), et (iii) comme outil d'évaluation des effets environnementaux (résultats pour le développement).

V.1.3. Problèmes particuliers du transport à La Réunion

Compte tenu de la topographie des régions concernées par les problèmes d'effluents d'élevage, le coût du transport sera un élément déterminant des solutions à promouvoir. Ce coût sera intégré dans la modélisation aux différentes échelles retenues. On peut en première approche retenir quatre niveaux de coût de transport qui correspondent à la fois aux potentialités techniques des matériels de transport et à la qualité de la voirie :

- épandage au champ (entre 2 et 4 km h^{-1}) avec tracteur + remorque, épandeur ou tonne,
- transport sur chemins d'exploitation avec le même matériel que l'épandage et une vitesse de déplacement comprise entre 2 à 3 km h^{-1} en charge et 4 à 6 km h^{-1} à vide,
- transport sur voirie rurale avec le même matériel (10 km h^{-1} en charge et 20 km h^{-1} à vide) ou avec un camion de faible tonnage (PTC < 12 tonnes) (30 km h^{-1} en charge et 50 km h^{-1} à vide),
- transport sur voiries départementale et nationale avec des camions (60 km h^{-1} en charge et 80 km h^{-1} à vide).

Ces données restent à affiner par des enquêtes dans chacune des localités étudiées, les temps de transport variant de façon importante selon les difficultés du réseau routier ou l'état des chemins d'exploitation. Les voiries départementale et nationale sont bien connues et la voirie rurale a été caractérisée finement à la demande de la Région Réunion. Dans la mesure où ces informations peuvent être reprises dans un SIG[12], la DAF[13] se proposait de réaliser ce travail, il serait possible de représenter géographiquement la contrainte coût de transport.

---

[12] Système d'Informations Géographiques

[13] Direction de l'Agriculture et de la Forêt

V.2. Filières de production - traitement - valorisation

Les études réalisées ont fait apparaître pour certaines régions de forts déséquilibres entre la production et la demande de matière organique. Ces déséquilibres concernent plus spécialement certains produits comme le lisier de porc et certaines localités où les possibilités d'épandage sont très limitées (Grand Ilet dans le cirque de Salazie par exemple). La nécessité d'organiser des filières "production - traitement - élimination ou valorisation" des déchets apparaît de plus en plus clairement dans ces contextes. F. Guerrin (1997) propose une nouvelle opération de recherche sur ce thème.

A partir d'une zone géographique donnée, dont la structure agricole est caractérisée par des exploitations produisant et/ou utilisant des déchets, il est proposé de concevoir de nouvelles filières possibles par l'adjonction en des lieux déterminés d'unités de traitement (compostage, épuration, fermentation) et d'en tester, sous différentes hypothèses, le fonctionnement par la simulation de modèles. La démarche retenue utiliserait différentes approches de modélisation quantitatives et qualitatives, ainsi que la modélisation par systèmes multi-agents, notamment dans le cadre d'une collaboration engagée avec l'IREMIA[14]. Il s'agirait (i) de modéliser et simuler les pratiques actuelles de gestion de déchets d'élevage dans une région déterminée[15] afin de vérifier la cohérence des données, caractériser les dysfonctionnements, identifier les échelles pertinentes et les variables sur lesquelles il est possible d'agir, (ii) de concevoir de nouvelles filières alternatives, solutions aux problèmes constatés, et (iii) de simuler le fonctionnement de ces alternatives en regard de critères économiques (investissements, coût des traitements, valorisation des composts) et environnementaux (rejets polluants, risques).

V.2.1. Conception de filières de production - traitement - recyclage des déchets d'élevage

Le problème peut être posé comme suit. Etant donnés (i) un espace géographique comprenant des unités de production de déchets, des unités susceptibles de les valoriser et des voies de communication reliant ces unités, et (ii) des contraintes à satisfaire (élimination, épuration ou valorisation de déchets, performances agronomiques, techniques de traitement disponibles et coûts et modes d'organisation acceptables), il s'agit de déterminer la conception des unités de traitement, leur localisation et leur système d'exploitation (individuel, collectif, fonctionnement).

Ces problèmes renvoient a priori aux problèmes d'allocation de ressources représentables dans un cadre statique. Un logiciel de satisfaction de contraintes flexibles Con'*Flex* developpé par l'INRA (Rellier *et al.*, 1997, *in* : Guerrin, 1997) pourrait alors être utilisé.

---

[14] Institut de Recherche en Mathématiques et Informatique Appliquées, Faculté des sciences, Université de la Réunion.

[15] deux localités seront étudiées : une avec de forts excédents (Grand-Ilet) et une avec des excédents importants mais présentant également des capacités de valorisation agronomique (zone de St Joseph).

V.2.2. Analyse de filières : simulation des flux

Le problème peut être posé comme suit. Etant donnée une configuration de filière composée d'unités, de voies de communication et de moyens d'exploitation (matériels, équipements, structures), il s'agit (i) de simuler la circulation des flux de matière organique en fonction du temps en distinguant les différents produits, (ii) d'analyser les résultats de simulation pour caractériser les dysfonctionnements (accumulations, ruptures d'approvisionnement ...) et pour modifier en retour la configuration initiale, et (iii) de simuler la nouvelle configuration obtenue.

Différentes approches méthodologiques peuvent être proposées : (i) simulation de systèmes dynamiques, (ii) modélisation compartimentale et systèmes multi-agents, et (iii) connexion de modèles quantitatifs et qualitatifs. Différents logiciels sont utilisables : Vensim, Qsim, simulateurs multi-agents (C.I.R.A.D. et I.RE.M.I.A.). L'élaboration d'une interface avec un système d'information géographique (type MapInfo) sera nécessaire pour restituer dans un cadre spatial les résultats de simulation et ainsi faciliter l'analyse et la prise de décisions par les différents acteurs impliqués.

V.2.3. Evaluation d'impacts agricoles et environnementaux

Au-delà des aspects d'organisation et de fonctionnement de filières d'élimination et de valorisation des déchets, se pose le problème des finalités qui seront distinguées selon les points de vue agricole (valorisation) et environnemental (élimination).

Dans le cadre de développements à plus long terme de ces outils de modélisation / simulations, l'impact agricole des différents types d'organisation de filières pourrait être abordé sous plusieurs aspects :

- impact sur la productivité et la durabilité des systèmes de cultures (amélioration ou restauration de la fertilité, rendements, économie d'intrants),
- impact sur les pratiques culturales et d'élevage (adéquation entre matières organiques brutes, méthodes de traitement, matières organiques traitées et besoins en fertilisants des cultures),
- impact sur l'économie et la gestion des exploitations (coûts, marges, valeur ajoutée, main d'oeuvre),
- impact sur l'organisation collective (fonctionnement des groupements, échanges de matières organiques).

L'impact environnemental concernerait les aspects suivants :

- impact sur la capacité d'épuration et d'élimination des déchets des différentes configurations testées (normes d'épandage, évaluation globale),
- impact sur des milieux ou des processus spécifiques (érosion, pollution, nuisances, qualité de l'eau, des paysages),
- impact différencié selon les niveaux d'organisation (échelles) : système sol-plante, parcelle, paysage, région, île entière.

VI. Transformation des déchets

VI.1. Mise en oeuvre de différents procédés de traitement

VI.1.1. Compostage de déchets d'abattoir

Dans le cadre de cette opération de recherche, un appui au stage de M. Thiery (1996) a été réalisé (protocoles de suivi, instrumentation des mesures sur site et aide à l'interprétation des données). Celui-ci a étudié le compostage lent par retournement de déchets d'abattoirs de volailles avec de la litière de volailles présente dans la localité de Grand Ilet. Cette étude a consisté à déterminer les conditions optimales de compostage (proportion de déchets dans le mélange, humidité, durées de fermentation thermophile et de maturation, nombre et fréquence des retournements), pour garantir une hygiénisation correcte du compost produit (température supérieure à 50 °C pendant 15 jours). Quatre essais ont été conduits (31, 38, 40 et 55 % de déchets carnés dans le mélange). Des analyses chimiques, d'hygiène et des tests de culture et respirométriques ont été réalisés dans les différentes phases d'évolution des composts.

Les rapports C/N des mélanges déchets carnés / litière sont faibles (de 9 à 11). Les températures durant la phase thermophile sont élevées, dépassant les 50 °C et atteignant parfois 65 °C à 50 cm de profondeur dans le tas. Chaque retournement se caractérise par une baisse immédiate de température, suivie par une remontée rapide (3 à 4 j) puis par une lente décroissance (moins de 1 °C j^{-1} durant 15 j). A 1 m dans le tas, les températures sont légèrement moins élevées du fait du manque d'oxygène. Dans le cas d'une proportion de déchets trop élevée (55 %), les températures sont un peu inférieures : 50 °C pendant 60 % du temps contre 50 °C pendant 80 % du temps pour un mélange avec 40 % de déchets. L'humidité optimale se situe entre 50 et 60 % ; à 40 % , les fermentations sont fortement ralenties. Elle décroît (- 0.36 % j^{-1}) avec les fermentations du fait de la température et des retournements. La teneur en MO décroît plus ou moins rapidement selon les aérations du mélange et selon l'humidité. Suite à l'important dégagement d'ammoniac, la teneur en azote passe rapidement de 3.8 à 2.5 % MS en 20 jours, elle se stabilise ensuite durant la maturation. Cette perte rapide d'azote provoque l'augmentation du rapport C/N (15 à 17) durant la phase thermophile (40 j) ; ensuite, celui-ci décroît progressivement pour atteindre 12 à 14 après 150 j.

L'hygiénisation des composts produits est correcte, aucun parasite ou bactérie pathogène n'a été détecté. La maturité des composts selon le seuil défini par Nicolardot *et al.* (1982), soit une consommation d'oxygène de 40 mg kg^{-1} MS h^{-1}, est atteinte après environ 140 j. Les tests de croissance sur culture de maïs montrent une phytotoxicité des composts jeunes (compost de 40 j utilisé pur et à 20 % en mélange avec de la terre, et compost de 138 j utilisé pur).

Suite à ce travail, les recommandations suivantes ont été formulées : incorporation de déchets carnés à 40 % en mélange avec de la litière de volailles, retournements tous les 10 j par passage d'un box à l'autre durant 6 semaines, maintien d'une humidité de 40 à 50 %, et maturation sur une aire extérieure durant au minimum 4 mois.

Ces références sur le compostage de déchets d'abattoir ont abouti à une application en vraie grandeur : une unité de compostage a été construite et permet, pour un coût modéré (335 F t^{-1}) de valoriser les déchets en compost. Afin d'assurer un fonctionnement correct de cette unité, l'accès à la valorisation de la production avicole des éleveurs par l'abattoir est maintenant subordonné à la fourniture de litière.

VI.1.2. Suivis d'unités de compostage de lisier de porcs

Le compostage peut présenter une solution pour le traitement des effluents porcins tout en répondant à une forte demande locale d'amendements stables très prisés par les maraîchers (Paillat *et al.*, 1996). L'objet de cette action est donc la mise au point de la technique de compostage par retournement du lisier de porc avec de la litière de poulets de chair. Celle-ci peut constituer un support carboné car elle est peu décomposée ; de plus, elle est souvent disponible chez certains éleveurs ayant deux ateliers hors sol. Il s'agit d'optimiser les apports de lisier à chaque épandage en calant les rythmes d'incorporation et de retournement, de contrôler le procédé (hygiénisation du mélange, bilan de masse), puis de déterminer la valeur agronomique du compost final.

L'exploitation suivie dispose d'un atelier de poulets de chair de 400 m^2, dont la litière est utilisée comme support carboné, et d'un atelier naisseur-engraisseur de 35 truies, produisant environ 800 m^3 de lisier par an. Il dispose également d'une plate-forme bétonnée non couverte de 110 m^2. Deux tracteurs de 55 et 85 ch, ainsi qu'un cultivateur rotatif à axe horizontal (rotavator) et deux tonnes à lisier de 3 et 6 m^3 sont utilisés. La litière est étalée sur une hauteur de 25 à 30 cm. Aussitôt l'épandage de lisier terminé, le mélange est malaxé à l'aide du rotavator. La durée de présence du mélange lisier / litière sur la plate-forme bétonnée suit le rythme de l'atelier de volailles, à savoir une évacuation toutes les 6 ou 7 semaines. Une fois cette première phase achevée, le produit est mis en tas de 1 m à 1,5 m pour mâturer. Un suivi des températures est effectué quotidiennement durant toute la période de mélange sur la plate-forme afin de déterminer le moment le plus opportun pour agir sur le tas dans le but de relancer l'activité des micro-organismes. Ces températures sont prises à 9 endroits différents à une profondeur d'environ 20 cm. La pluviométrie est également relevée chaque jour.

Des prélèvements dans le tas sont effectués à 5 stades en vue d'analyses chimiques : les matières premières, juste avant l'incorporation du lisier au support (stade 0), le mélange en sortie de plate-forme (stade 1), puis 1, 3 et 5 mois après la sortie de la plate-forme (stades 2, 3 et 4, respectivement) ; la sortie de plate-forme est réalisée peu de temps après la dernière incorporation de lisier. La masse de matières carbonées est calculée à partir du volume mesuré et des pesées effectuées par échantillonnage pour en déterminer la densité. Les quantités de lisier sont évaluées en citernes épandues ; la valeur du lisier déterminée lors du premier épandage est supposée constante entre les épandages. Les analyses effectuées pour les 4 premiers prélèvements sont : les teneurs en matières sèches (MS), matières organiques (MO), azote total (N total) et ammoniacal ($N\text{-}NH_4$) et le pH. Pour le dernier prélèvement, les teneurs en phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg) sont également déterminées.

45 m^3 de lisier très dilué ont été incorporés en 6 fois à 31,4 m^3 de litière de volaille (figure 14). La pluviométrie est restée assez faible durant la première partie du suivi. La température moyenne du tas de 25 à 30 cm de hauteur monte au-dessus de 55°C pendant plusieurs jours, jusqu'au ratio volumique litière / lisier de 1. En dessous de ce ratio, les malaxages favorisent la montée en température du tas. Au-delà d'un ratio de 1, les températures décroissent régulièrement, les malaxages permettent une légère remontée en température, insuffisante pour une hygiénisation correcte qui nécessite des températures maintenues au-dessus de 50°C pendant 2 semaines (Jackson, *in* : Thiery, 1996). L'éleveur cherche à réduire l'intervalle de temps entre 2 apports et à maximiser la quantité de lisier incorporée. La montée des températures au-dessus de 50 °C pendant 2 semaines, nécessaire à l'hygiénisation du tas, n'est donc pas systématiquement recherchée.

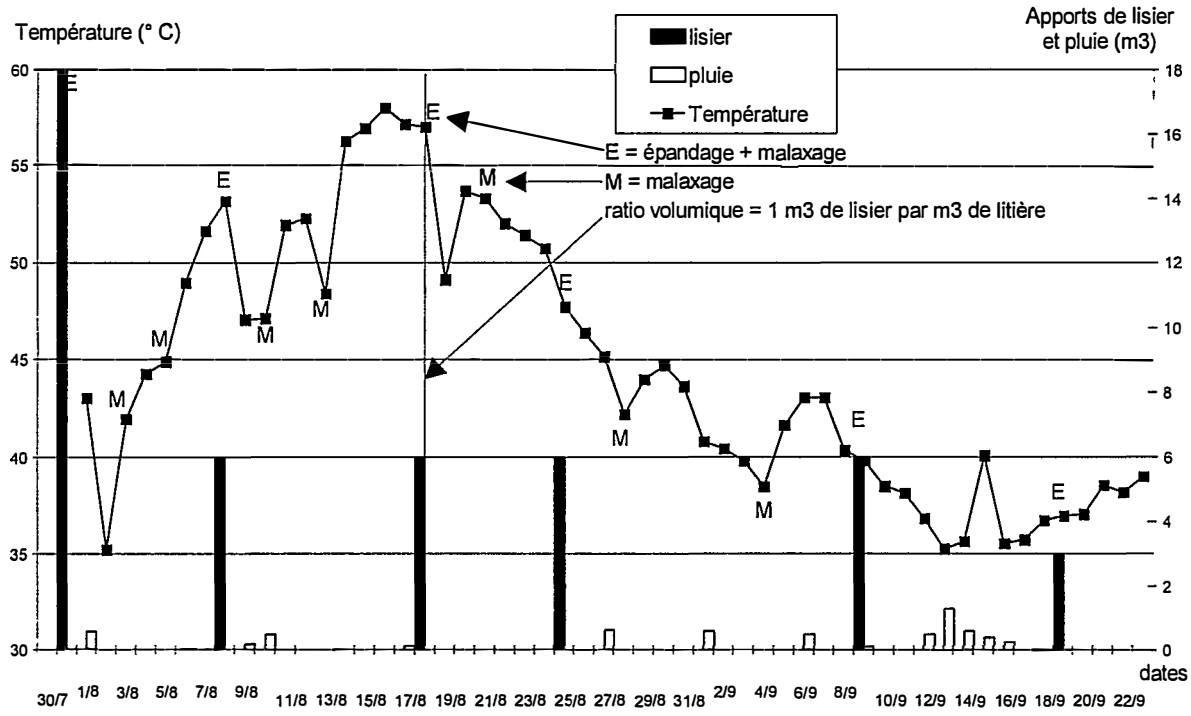


Figure 14 : *Suivi des épandages, malaxages, de la température du tas et de la pluviométrie*

Avec la litière de volailles en tas de 30 cm, il ne semble pas possible de dépasser le ratio de 1. Une mise en tas de 1,5 m après chaque passage de rotavator pourrait permettre d'augmenter ce ratio. Pour davantage d'efficacité, l'emploi d'un retourneur d'andain serait préférable. Un autre itinéraire technique consisterait à distinguer trois phases : l'incorporation en tas de 30 cm, avec, entre chaque apport un malaxage au rotavator, pouvant s'effectuer durant 6 semaines jusqu'à l'obtention d'un rapport volumique de 1, puis la fermentation thermophile en tas de 1.5 m avec 3 retournements du tas pendant un mois pour une hygiénisation correcte, et enfin la maturation.

Tableau 8 : Caractéristiques moyennes des produits de départ et aux stades 1 (sortie de plate-forme) et 2 (1 mois après la sortie)

	pH	Teneur en MS (%)	MO (% MS)	MO/2N	N total (% MS)	$N\text{-}NH_4$ (% N total)
Litière	8.3	71.1	85.8	14.0	3.1	18.4
Lisier	8.0	1.7	61.8	3.7	8.3	94.2
stade 1	8.1	31.4	68.1	19.8	1.7	0.1
stade 2	7.9	31.4	69.6	23.2	1.5	0.1

Les analyses ont montré une bonne homogénéité de la litière de volailles, mais par contre une grande hétérogénéité des lisiers. Suivant leur provenance, lisier de porcs à l'engraissement ou de truies gestantes, les teneurs en éléments des effluents offrent une grande variabilité. Ces résultats (tableau 8) montrent une évolution vers une réorganisation de la matière organique après élimination d'une grande partie de l'azote sous forme ammoniacale par volatilisation. Cette perte en azote provoque la remontée du rapport C/N (équivalent MO/2N). Le pH décroît progressivement. L'azote sous forme ammoniacale disparaît du produit. La teneur en MS reste assez stable durant la maturation, le stade 2 correspondant à 1 mois de maturation environ.

Tableau 9 : Evolution des quantités de MS, d'eau, de MO et d'azote

	Matière brute (kg)	MS (kg)	Eau (kg)	Teneur en MS (%)	MO (kg)	N total (kg)	$N\text{-}NH_4$ (kg)
Lisier	46600	800	45800	1.7	500	65	60
Litière de volailles	12900	9200	3700	71.1	7900	280	50
Pluie			6300				
Poids total	59500	10000	55800	(*)	8400	345	110
stade 1	13200	4100	9100	31.4	2800	70	0.1
pertes (%)	78	59	84		67	80	100
stade 2	12500	3900	8600	31.4	2700	60	0.1
pertes (%)	79	61	85		68	83	100

(*) Cette donnée ne correspond à aucune réalité à un instant t. Les épandages s'effectuant sur une période de 1.5 mois, d'importantes pertes d'eau et de matières ont lieu. La teneur en MS varie donc au cours du temps.

Les pertes sont importantes tant en masse (près de 80 % du poids brut), qu'en valeur (plus de 80 % de l'azote éliminé principalement en ammoniac). Ce procédé constitue donc une voie de traitement possible des lisiers de porcs (tableaux 9 et 10). Il permet de réduire considérablement les masses à épandre, donc le coût. Il permet une élimination d'azote, mais avec le risque environnemental constitué par le rejet d'ammoniac dans l'atmosphère. Enfin, le produit obtenu est très riche en phosphore et potasse. Sous réserve d'une maturation suffisante, son utilisation peut s'avérer intéressante en maraîchage.

Tableau 10 : Ratios d'incorporation obtenus du lisier à la litière de poulets de chair

volume (m^3 / m^3)	masse brute (kg / kg)	volume / masse brute (m^3 / t)	volume / masse sèche (m^3 / t MS)
1.4	3.6	3.5	4.9

Les travaux sur l'évaluation du compostage des lisiers sur différents supports sont donc bien engagés. Six autres essais sont en cours actuellement : 2 essais d'incorporation de lisier de porc sur litière de volailles, 2 essais d'incorporation de lisier de porcs sur copeaux de bois et 2 essais d'incorporation de lisier de lapins sur litière de volailles.

VI.1.3. Proposition de nouveaux procédés

Dans un proche avenir, d'autres principes de traitement devraient pouvoir être testés à la Réunion (Farinet, 1995; Hurvois, 1997) : épuration de l'azote par stabilisation aérobie mésophile (procédés Licom, Alpha laval, Flygt), par nitrification / dénitrification avec ou sans séparation mécanique de phases (procédés Bioarmor, Denitral, Valepure), filtration biologique (procédés Agrifiltre et Transpaille).

La stabilisation aérobie mésophile (Sogreah, 1996) est un procédé simple (aération du lisier), peu coûteux pour un abattement significatif de l'azote (- 50 %) effectué par volatilisation sous forme d'ammoniac. Interdite en métropole, cette volatilisation ammoniacale pourrait être tolérée à La Réunion, eu égard aux régimes de vents, au caractère océanique du climat et à l'isolement insulaire. Le lisier est désodorisé. Couplé avec une réduction du phosphore à la source (alimentation des animaux), ce procédé permet une réduction importante du plan d'épandage.

Le traitement biologique par nitrification / dénitrification, très étudié en France (Sogreah, 1996), est maintenant au point (- 70 % de N). Les coûts d'investissement et de fonctionnement ont été optimisés pour des unités d'élevage de grande taille (> 300 TNE[16]) ou pour des traitements collectifs. L'effluent traité peut être géré par irrigation (fourrage, canne à sucre, fruitiers). Cependant, la gestion des boues semi-liquides, riches en phosphore, reste un problème à La Réunion compte tenu des surfaces d'épandage réduites et de l'inadéquation de ce co-produit avec les cultures maraîchères.

Le traitement biologique avec biofiltration (D'Amato, 1989 ; Farinet, 1993 ; Forest, 1993 ; Gotin, 1993) est en phase de test en vraie grandeur (- 95 % de N si exportation totale du co-produit). Associant les techniques de méthanisation et de nitrification / dénitrification, il présente l'avantage de générer un co-produit solide facilement exportable et utilisable sur cultures maraîchères (fumier ou compost selon le degré de maturation envisagé). Le second co-produit constitué par l'effluent fortement épuré peut être géré par irrigation (fourrage, canne à sucre, fruitiers). La consommation en support carboné est réduite par rapport à un compostage classique sur plate-forme. Des études hydrodynamiques des différents supports locaux (paille de canne à sucre, bagasse, copeaux) sont prévues en 1998.

---

[16] Truie Naisseur - Engraisseur

Les procédés de traitement sont souvent très coûteux et constituent des solutions partielles dans la mesure où plusieurs co-produits issus du traitement doivent ensuite être gérés. Certains procédés permettent d'éliminer l'azote de façon plus ou moins contrôlée (rejet dans l'atmosphère de N_2 ou NH_3), mais ils concentrent le phosphore et la potasse dans les co-produits plus facilement exportables que le lisier brut, mais pour lesquels une valorisation reste à trouvée. Les solutions proposées par ces divers procédés doivent donc entrer dans une stratégie globale de résorption des excédents. Dans cette stratégie, la réduction à la source de la pollution par l'alimentation animale prend une grande importance (aliments biphase, multiphase, phytases pour les porcins, supplémentation en acides aminés essentiels et aliments moins riches en azote et phosphore pour les volailles) (Hurvois, 1997).

Parmi ces techniques ou d'autres présentant un intérêt pour la Réunion, un choix sera fait, pour chacune des situations, en fonction des nécessités de traitement (volume de lisier), des différents sous-produits issus du traitement à gérer et des coûts d'installation et de fonctionnement (figure 15). La faisabilité de projets, montés en partenariat avec les éleveurs et leurs organisations professionnelles, est en cours d'évaluation, le C.I.R.A.D. assurant une aide à la décision basée sur des simulations d'investissement et de fonctionnement.

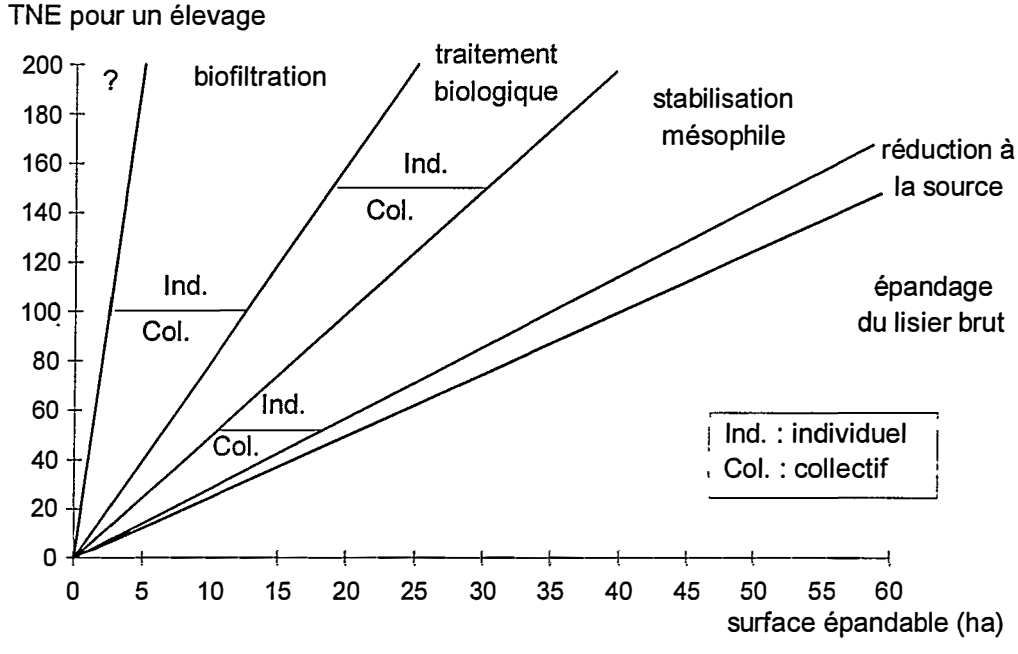


Figure 15 : *Intérêt relatif des différents procédés selon le cheptel et la surface épandable avec seuil de rentabilité estimé pour passer d'un traitement individuel à un traitement collectif (d'après Hurvois, 1997 : raisonnement sur la base d'un apport de 210 kg de N par ha)*

VI.2. Diagnostic de maturité des amendements organiques

VI.2.1. Suivi de la teneur en MS sur sites de compostage avec un four à micro-ondes

Le suivi de la teneur en MS durant le processus de fermentation des composts constitue un moyen de pilotage pour déclencher les retournements, aération ou humidification, la teneur idéale se situant entre 40 et 50 % (Mustin, 1983). L'utilisation du four à micro-ondes permet d'apporter un diagnostic immédiat (15 à 20 min) sur le chantier de compostage, sans être contraint d'acheminer un échantillon au laboratoire pour une détermination de la teneur à l'étuve durant plusieurs jours. Cette technique avait déjà été utilisée et étalonnée sur fourrages verts (Corrot, 1991) et sur ensilage d'herbe (Paillat, 1995). L'objectif de ce travail (Lorré *et al.*, 1996) était donc d'adapter la méthode dans le cas des composts.

La technique nécessite un four à micro-ondes réservé à cet usage (odeurs), une balance électronique de ménage (précision 1 g), des égouttoirs en matière plastique, un récipient d'eau (verre). Un abaque a été élaboré pour déterminer la quantité approximative de compost à mettre au séchage en fonction d'une teneur supposée en MS (estimation au toucher). L'échantillon est pesé puis mis au séchage durant 5 min, four réglé à 700 - 750 W restitués, puis à nouveau durant 5 min, four réglé à 600 - 650 W restitués. L'échantillon est ensuite sorti et pesé. Cette dernière opération est renouvelée jusqu'à l'obtention du même poids durant trois pesées successives. Un récipient d'eau est placé dans le four à côté de l'échantillon lorsqu'une odeur sèche devient perceptible, avant l'odeur de "brûlé". Cette précaution indispensable évite l'inflammation du compost et permet de mieux terminer la dessiccation.

L'étalonnage réalisé au laboratoire a permis de déterminer les corrélations entre les valeurs mesurées au four à micro-ondes et celles mesurées à l'étuve (105 °C pendant 48 h). Une correction par gamme de teneur en MS est cependant nécessaire :
Pour une teneur en MS micro-ondes inférieure à 45 % : $MS_{calculée} = 0.9936\ (MS_{micro\text{-}ondes} - 1.7)$
Pour une teneur en MS micro-ondes entre 45 et 65 % : $MS_{calculée} = 0.9936\ (MS_{micro\text{-}ondes} - 2.2)$
Pour une teneur en MS micro-ondes supérieure à 65 % : $MS_{calculée} = 0.9936\ (MS_{micro\text{-}ondes} - 2.7)$
Cette correction procure un bon étalonnage avec la régression globale suivante :
$MS_{micro\text{-}ondes} = MS_{étuve} + 0.017 \pm 1$ ($R^2 = 0.997$).

L'erreur sur les mesures dépend du poids de l'échantillon et de la teneur en MS. Pour une balance précise à 1 g, elle est de l'ordre de 5 %. La méthode de séchage au four à micro-ondes ne remplace donc pas une détermination à l'étuve plus précise pour les échantillons destinés à des analyses physico-chimiques. Par contre, elle présente un intérêt certain pour effectuer un diagnostic rapide sur le terrain, dans l'objectif de piloter le fonctionnement d'une plate-forme de compostage.

VI.2.2. Mise au point d'un dispositif de respirométrie

Plusieurs études ont été menées depuis 1995 pour adapter une technique d'évaluation de la maturité des composts grâce à l'estimation de sa respiration. Cette technique repose sur la mesure de dépression créée dans un autocuiseur étanche, par le piégeage dans la soude du CO_2 dégagé lors de la fermentation du compost (Nicolardot *et al.*, 1982). Plus la respiration est intense (compost non mature), plus la dépression est forte. La respiration du compost est évaluée en mg d'O_2 consommé par kg de MS de compost par heure.

Le dispositif est constitué de quatre autocuiseurs en parallèle (3 répétitions par amendement étudié + un autocuiseur de référence sans amendement), dans lesquels sont disposés un récipient contenant la soude et un autre (sauf pour la référence) contenant l'amendement à 80 % de la capacité de rétention en eau. Chacun des autocuiseurs est relié à un capteur de dépression, lui-même connecté à une centrale d'acquisition de données. Les mesures de dépression sont effectuées toutes les 5 minutes durant l'incubation qui dure 3 jours.

Un premier travail (Mara, 1995) a consisté à valider le dispositif par la compréhension des échanges thermodynamiques. Le second a validé la méthode en comparant les tests respirométriques avec la germination sur les amendements organiques (Nouroudine, 1995). Enfin un troisième travail (Hélène, 1996) a permis d'affiner les procédures analytiques (protocoles) permettant ainsi de vérifier l'étanchéité des autocuiseurs, de suivre en temps réel la dépression et de transférer les données pour exploitation sur micro-ordinateur.

Trois courbes d'évolution de la dépression sont tracées par amendement testé (en tenant compte de la dépression de référence). Elles ne montrent généralement qu'une faible variabilité entre elles (figure 16). La pente de la courbe moyenne (moyenne des trois répétitions) est alors calculée entre 10 et 110 mbar, afin d'écarter les artefacts liés au démarrage de l'activité respiratoire, puis à la raréfaction de l'oxygène du milieu. La quantité d'oxygène consommée par heure est calculée à partir de cette pente moyenne, à l'aide de la formule suivante :

$$Q_{O2} = \frac{V.\Delta P.32.10^6}{R.T.PS}$$

Q_{O2} : Consommation moyenne horaire d'oxygène (mg O_2 kg^{-1} compost sec h^{-1})
ΔP : Pente de la courbe de mesure (mbar h^{-1})
V : Volume gazeux = volume autocuiseur - volume de soude - volume compost (l)
T : Température du milieu (T = 303 K)
R : Constante des gaz parfaits (R = 83,14 l mbar mol^{-1} K^{-1})
PS : Poids sec de compost (g)

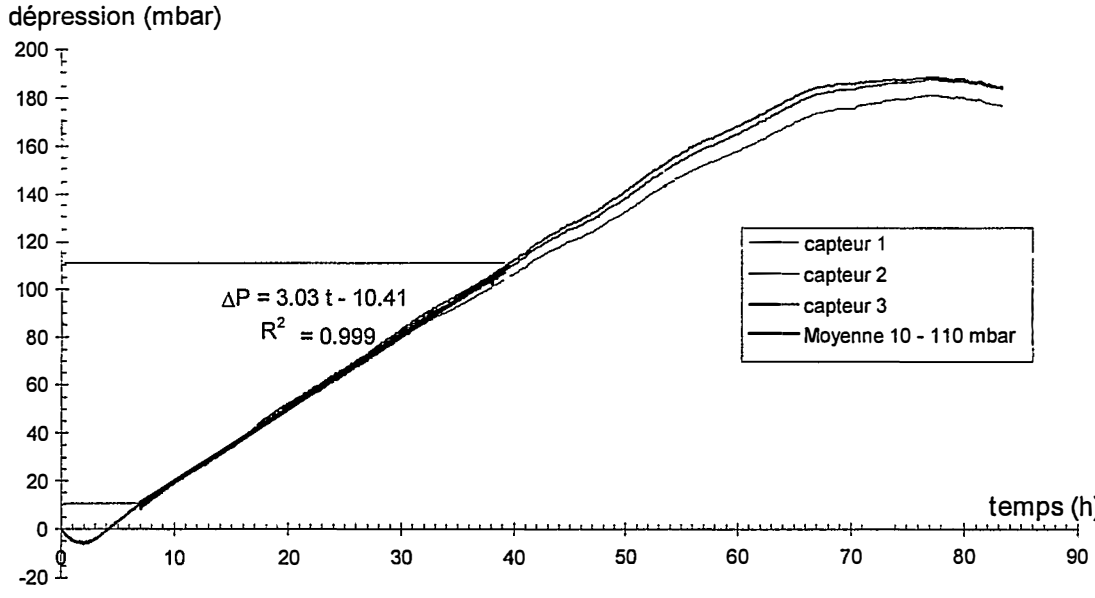


Figure 16 : *Suivi de la dépression lors de l'incubation d'un compost (3 répétitions)*

Suite à cette mise au point technique, une enceinte a été construite au laboratoire d'analyses du CIRAD pour recevoir ce dispositif avec les équipements de contrôle et de mesure nécessaires (capteurs de dépression, vannes d'isolement des voies de mesures, choix de gamme de mesures, enregistreurs mono-voies, liaisons vers l'ordinateur).

VI.2.3. Détermination de seuils d'innocuité des amendements

Une étude complémentaire (Onaly, 1997) avait pour objectif de caler les mesures en fonction des conditions thermiques[17] par la détermination de seuils d'innocuité ou de maturité des amendements organiques divers en conditions réunionnaises. La connaissance de seuils d'innocuité doit permettre au laboratoire de porter un diagnostic destinés aux maraîchers, horticulteurs et fabricants de compost pour l'utilisation des amendements organiques analysés.

Afin de comparer les réactions physiologiques des plantes, des cultures de maïs et de triticale ont été mises en place sous serre, sur sol pur et sur des mélanges sol - amendement organique à différentes doses. Différents amendements de composition et de stade d'évolution divers ont ainsi été testés. 5 graines de maïs et 33 de triticale sont semées dans des pots contenant, soit de la terre additionnée ou non d'amendement organique à 5 et 30 %, soit de l'amendement organique seul. Les quantités apportées correspondent respectivement à des apports de 0, 50 et 300 t d'amendement à l'hectare. Chaque traitement et chaque plante font l'objet de 5 répétitions. Les pots sont disposés en 5 blocs randomisés, chacun d'entre eux comportant 4 pots (0, 5, 30 et 100 % d'amendement organique).

---

[17] le process utilisé à la Réunion fonctionne à une température ambiante de 30 °C, alors que les seuils d'innocuité proposés par Nicolardot *et al.* (1982) en métropole sur composts urbains ont été déterminés à 20 °C.

Pour les deux plantes, un suivi quotidien de la germination est effectué pendant 7 jours. Une coupe destinée à la détermination de la biomasse est effectuée au 34ème jour. Les parties aériennes recueillies sont pesées puis séchées (étuve à 75°C pendant 24 heures) pour calculer la teneur en MS. Le taux de germination permet de corriger le poids sec à 34 jours. De plus, pour le maïs, le nombre de feuilles par plante ainsi que le nombre de plantes flétries sont comptés quotidiennement dans chaque pot jusqu'au 14ème jour ; le jour d'apparition des feuilles est noté jusqu'au 34ème jour.

A partir des observations, 12 variables ont été mesurées. L'analyse de variance (test de Fischer) pour chaque amendement a permis de retenir les variables les plus sensibles. Ces analyses ont permis également d'exclure l'influence des blocs. Les variables pertinentes retenues sont donc :

- VC = vitesse de croissance du maïs, pente de la droite nombre de feuilles = f (temps),
- PF14 = rapport du nombre de plants de maïs flétris au 14ème jour sur ceux qui ont germé,
- PM34 = rapport du nombre de plants de maïs morts au 34ème jour sur ceux qui ont germé,
- PS34 = poids sec par plant de maïs au 34ème jour,
- TXG4 = taux de germination du triticale au 4ème jour,
- PSGE = poids sec du triticale corrigé par le taux de germination au 7ème jour.

Les tests statistiques effectués (Fischer, Student) sur les 6 variables retenues ont permis de mettre en évidence des différences significatives entre traitements ainsi qu'en comparaison du témoin (sol seul). Le taux de germination du maïs ne présente pas de variations significatives. Pour le triticale, le retard dans la germination ne semble pas corrélé à la nature du support mais plutôt à sa structure : un amendement très aéré retient moins l'humidité, limitant de ce fait la germination. Plus un amendement évolue vers la maturité, plus les taux de flétrissement et de mortalité des plantules régressent, meilleures sont la vitesse de croissance et la production de biomasse.

Pour tous les amendements testés, un apport organique de 50 t ha^{-1} réparti dans les 10 premiers centimètres du sol ne présente pas de danger pour le maïs, et *a fortiori* pour le triticale. Pour des doses d'amendement supérieures, plusieurs paramètres influent sur la croissance de la culture :

- la sensibilité de l'espèce, le maïs est plus sensible que le triticale au milieu de culture,
- suivant sa composition, l'amendement peut contenir des éléments phytotoxiques, présenter un pH très éloigné de la neutralité, ou bien posséder une charge ionique défavorable à la culture,
- la texture de l'amendement influence la capacité de rétention en eau et le développement racinaire, donc la croissance du végétal,
- l'activité respiratoire du substrat et la présence de substances transitoires non assimilables peuvent également être nocives pour la plante.

Un compost jeune a plus tendance à inhiber le développement végétal et à fragiliser les plantes qu'un compost mûr. Lorsque l'amendement a une activité respiratoire élevée et lorsqu'il est apporté en quantité importante (300 t ha^{-1}), sa phytotoxicité se traduit rapidement sur l'évolution de la plante.

Cependant, les caractéristiques respirométriques n'expliquent pas à elles seules les différents comportements végétaux observés. D'autres facteurs interviennent, notamment la conductivité, le pH, la teneur en ammoniac, la teneur en MO. La méthode respirométrique permet d'estimer l'état d'avancement de la maturité d'un amendement mais ne permet pas, seule, de prévoir d'éventuels effets phytotoxiques. Il semble donc difficile de déterminer des seuils de maturité à partir de ces essais, tel qu'avait pu le faire Nicolardot (1982). En effet, les essais menés à la Réunion ont concerné des amendements organiques très divers, contrairement aux expériences conduites en métropole uniquement sur composts urbains. Les facteurs intervenant semblent donc multiples.

Pour poursuivre les investigations à partir des données obtenues, des analyses multi-factorielles sont en cours afin de déterminer les liaisons entre les analyses physico-chimiques (variables explicatives) et les tests culturaux (variables expliquées). Pour ce faire, les amendements ne seront plus considérés en tant que tels mais davantage comme substrats (mélange terre - amendement). A partir de ces analyses, les amendements ou substrats particuliers (conductivité élevée, pH faible) seraient écartés de la détermination des seuils. Ceux-ci pourraient être obtenus par une visualisation graphique (classement par ordre d'activité biologique) des résultats des tests de Fischer ou Student effectués.

L'évaluation de l'innocuité des amendements organiques nécessite donc encore des travaux de recherche pour affiner la méthode, avant son utilisation par le laboratoire d'analyses comme diagnostic pour le conseil aux agriculteurs.

VII. Valorisation des déchets organiques par l'agriculture

Avec 500 000 t par an, les effluents d'élevage représentent le gisement le plus important de déchets (70 % en matière brute et 77 % de l'azote) (MVAD, 1996). Ces déchets doivent être valorisés en agriculture selon des méthodes économiquement et techniquement acceptables en respectant les normes en vigueur. Cependant, la situation de la Réunion (climats et sols tropicaux variés, relief accentué, diversité des systèmes de production ...) ne permet pas d'appliquer directement les connaissances et les règles adaptées au contexte de la France métropolitaine (Chabalier *et al.*, 1998).

En effet, les quantités d'unités fertilisantes qu'un couple sol-plante peut absorber dépendent de la culture (besoins, flux d'absorption, enracinement) et des conditions pédoclimatiques. Le couple sol-plante constitue un formidable outil d'épuration dont les dimensions verticales et horizontales définissent les deux grands risques majeurs de pollution diffuse :

- la pollution par ruissellement avec contamination des eaux superficielles,
- la pollution par lessivage et la contamination des eaux souterraines par les nitrates.

Les risques de pollution de l'air par la volatilisation de l'ammoniac, bien que difficile à quantifier, peuvent être également importants. Ils sont liés aux pratiques de stockage, transformation ou épandage.

Les pratiques de recyclage des effluents doivent donc limiter ces risques de pollution en tenant compte de la capacité épuratrice des sols (pouvoir de nitrification / dénitrification). Afin d'évaluer les potentialités de l'agriculture à valoriser ces effluents, il est indispensable d'effectuer des essais agronomiques. Les résultats attendus sont l'évaluation du potentiel à recycler les éléments contenus dans les effluents et l'identification des limites et des contraintes de chaque milieu et de chaque système.

La M.V.A.D., dans le cadre de la mission que lui a confiée son comité de pilotage (Etat, Région, Europe), a demandé au C.I.R.A.D. de formuler un programme de recherche-développement concernant la valorisation agricole des déchets. En réponse, Pouzet (1996) propose des dispositifs expérimentaux complémentaires pour étudier les valorisations possibles des déchets agricoles, industriels et urbains par la canne à sucre :

1 - caractérisation des déchets par le laboratoire ; cette action a démarré en 1996, de nombreux échantillons ont été acheminés au laboratoire d'analyses du C.I.R.A.D. par les techniciens de la M.V.A.D. qui doivent se charger d'en faire une synthèse ;
2 - essais sur colonnes de sols remaniés ; les premiers essais ont débuté en 1997 pour trois types de sols (Chabalier, 1997) ;
3 - étude du ruissellement ; aucun essai n'est encore prévu sur ce thème, mais le C.I.R.A.D. a une expérience notable de mesure de l'érosion parcellaire sur andosols avec ou sans couverture végétale (Perret, 1992 ; Michellon *et al.*, 1995 ; Perret *et al.*, 1997),
4 - essai agronomique en milieu contrôlé (blocs de Fischer) ; un essai a été mis en place pour trois ans chez un agriculteur par la M.V.A.D. avec l'appui technique et scientifique du C.I.R.A.D. ;
5 - établissement des courbes de réponse de la canne à sucre à la fertilisation organique ; ces mesures demandent un travail important de notations et pesées durant tout le cycle végétatif de la canne ; une liaison avec les modèles de croissance (Martiné, 1996) sera peut-être possible sans investir dans des dispositifs de mesures trop coûteux en temps et main d'œuvre ;
6 - tests en milieu réel (réseau de couples de parcelles avec et sans déchets chez les agriculteurs) ; la M.V.A.D. et les techniciens du S.U.A.D. ont mis en place une vingtaine de parcelles tests.

VII.1. La matière organique dans les sols de La Réunion

Chabalier (1995) a présenté l'intérêt et les caractéristiques de la matière organique dans les sols de La Réunion. Ce document constitue un préalable intéressant pour l'étude de la valorisation des déchets organiques dans ce contexte insulaire.

La matière organique était classiquement recyclée dans la culture de la canne à sucre. Depuis la concentration usinière, et le développement de la motorisation, celle-ci est utilisée principalement par le maraîchage, cultures à forte valeur ajoutée. De même, la production traditionnelle de fumier à partir des bœufs utilisés en traction animale a fortement diminuée ; cependant, des programmes récents tentent de relancer cette production pour contrecarrer l'appauvrissement en MO des sols des Hauts de l'Ouest soumis à l'érosion.

Depuis quelques années, l'élevage est en plein essor. L'élevage bovin produit de la matière organique (lisier et fumier) généralement recyclée sur les surfaces herbagères de l'exploitation, bien que l'augmentation actuelle du chargement à l'hectare par l'approvisionnement en ressources fourragères extérieures tend vers un excédent en fertilisants organiques. Parallèlement, les nombreux élevages hors sol installés récemment constituent une offre importante de matière organique à valoriser. Les cultures maraîchères utilisent de façon abondante les matières organiques solides ; par contre, les lisiers. boues ou effluents semi-liquides sont difficiles à utiliser, d'où des rejets directs dans le milieu naturel qui constituent un risque important de pollution et une perte pour la production agricole.

En effet, la matière organique est un facteur important de production pour l'agriculture réunionnaise. Comme pour la plupart des sols, les apports de MO améliorent les productions et la fertilité des sols, mais ils sont plutôt mieux valorisés qu'ailleurs du fait de la présence d'andosols avec des particularités chimiques et une érosion intense qui décape régulièrement les couches fertiles. Dans les andosols, l'accumulation de MO est due aux composés organo-minéraux stables. Ces complexes sont liés à de fortes quantités d'alumine et de fer. Cette MO est incluse dans différents niveaux de structuration des agrégats ce qui explique la grande stabilité de la MO et sa teneur élevée (Checkouri, 1990).

La minéralisation dans les andosols, mesurée par respirométrie (Py et Clariond, 1989), est variable selon l'utilisation de ce sol : 0.87, 0.33 et 0.14 % du total de la MO en 18 j pour un sol sous friche, un sol cultivé non érodé et un sol cultivé érodé, respectivement. Le phosphore est fortement fixé dans les andosols (de 2000 à 4000 ppm) avec une proportion de 30 à 60 % réversible. Ce pouvoir fixateur est bien corrélé avec la MO qui joue un rôle de protection contre la fixation du phosphore. Dans les andosols, la fertilité en phosphore est liée à la MO, alors que dans les sols ferralitiques, elle est liée à la fertilité en calcium et au pH du sol.

Six grandes catégories de sols sont définis à La Réunion : ferralitique, vertisol (peu présent à La Réunion), brun, brun andique, andosol et andosol perhydraté (Pouzet *et al.*, 1997). Sur le plan de la matière organique et du pouvoir minéralisateur, (i) les plus fortes quantités de N minéral sont données pour les andosols, les plus faibles pour les ferralitiques, (ii) la vitesse de minéralisation est très forte pour les vertisols, moyenne pour les andosols et faibles pour les autres, (iii) le temps de demi-vie de la MO est très faible pour les vertisols (18 j), moyen pour les andosols (20 à 50 j) et long pour les autres (240 j pour le sol brun), enfin (iv) les coefficients de minéralisation sont plus faibles pour les andosols que pour les autres sols.

Sous cultures annuelles, dans les sols tropicaux, les teneurs en MO diminuent fortement en fonction du temps. De plus, à La Réunion, l'érosion intense (1 mm de sol par an), très supérieure à la pédogénèse, appauvrit le sol en MO. Cependant, pour la canne sur sols ferralitiques, le stock de MO a plutôt tendance à se stabiliser voire même à augmenter avec le temps, grâce aux restitutions importantes de cette culture. Par contre, pour les cultures vivrières sur andosols, aucun effet spectaculaire d'apports de MO n'a pu être mis en évidence sur le stock de MO, malgré la tendance de ces sols à accumuler la MO qui se minéralise peu. En fait, les apports de MO servent à reformer l'humus que l'érosion enlève avec la couche superficielle du sol ; ainsi, une augmentation significative des teneurs en MO du sol nécessiterait des apports de MO très importants et réguliers.

La décomposition des pailles de canne (15 à 25 t MS ha^{-1}) améliore la fourniture d'éléments au sol et à la canne à sucre (utilisation directe de 10 à 15 % de l'azote des résidus). Pour les autres cultures, les apports de fumiers et composts plus ou moins stabilisés ont un effet favorable sur les plantes et le sol. Ils se minéralisent vite en libérant de nombreux éléments nutritifs et les reliquats préhumifiés sont incorporés à la MO du sol. Ces apports améliorent de façon très nette la fertilité des andosols en permettant le démarrage d'une activité microbienne rapide en sol non érodé, plus lente en sol érodé.

Généralement, en pays tropical, le turn-over de la MO est rapide du fait de la température et des conditions souvent favorables d'humidité. De ce fait, la MO du sol peut se minéraliser avec des coefficients annuels pouvant atteindre 10 %. Ceci est vrai également pour toutes les formes de MO apportées (paille, fumier, compost ...). Ce turn-over est 4 fois plus élevé qu'en conditions tempérées. A la Réunion, il est cependant difficile d'établir une loi générale du fait de la grande diversité de sols tropicaux, andosols notamment, et de climats et du fait de la topographie de l'île qui provoque une érosion intense. De ce fait, afin de proposer des plans d'épandages des divers déchets produits, des expérimentations sont nécessaires pour définir les capacités des cultures et des sols à utiliser les amendements organiques. Les plans d'épandages dépendront donc vraisemblablement non seulement des besoins des cultures, mais également des types sols et de leur position topographique (sensibilité à l'érosion).

VII.2. Etude de la capacité d'épuration des sols de La Réunion

Peu d'essais sur la capacité épuratrice des sols ont été menés à La Réunion. Une première étude sur colonne de sol a été réalisée pour comparer trois types de sol. Les aspects étudiés sont les suivants (Chabalier, 1997) :

- modalités de transfert de l'eau et des solutés dans les sols,
- vitesses de minéralisation de la MO des sols et des substrats,
- conditions de nitrification / dénitrification,
- rôle de la plante dans le système.

VII.2.1. Matériel et méthode

Des colonnes en PVC de 50 cm de longueur et 11.7 cm de diamètre ont été utilisées. Trois sols représentatifs de zones de culture de la canne à sucre ont été prélevés : un sol ferralitique du nord (LM), un sol ferralitique andique du sud-ouest (SP) et un sol brun andique de l'ouest (PSL). Les colonnes sont remplies avec du sol tamisé et homogénéisé.

Ces sols ont été soumis à trois traitements correspondant à un apport de 200 unités d'azote par ha : engrais minéral (ammonitrate), lisier brut et compost d'ordures ménagères. Un témoin sans apport est incorporé aux traitements. Une série de colonnes est restée en sol nu, une autre série a été cultivée en gazon (ray-grass), soit, pour chaque sol, deux essais avec 4 traitements et 3 répétitions en blocs, soit au total 72 colonnes. Le lessivage de l'azote sous les colonnes a été suivi pendant 3 mois sous un régime d'arrosage simulant les pluies de la saison pluvieuse, soit un apport hebdomadaire de 44 mm (soit 500 cm^3 par colonne).

VII.2.2. Premiers résultats

Mobilisations de N par la culture

Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (tableau 11) est le rapport entre la mobilisation d'azote par le gazon (3 coupes ont été pesées et analysées en N) moins celle du témoin, correspondant à l'azote du sol minéralisé et absorbé par la plante, et l'apport initial d'azote. C'est l'azote provenant des produits apportés et directement assimilé par la plante.

Tableau 11 : *Coefficient d'utilisation apparent de l'azote (en % de la dose apportée)*

sols	engrais	lisier	compost
LM	79	26	10
SP	72	64	15
PSL	64	43	35
moyenne	72	45	20

Le coefficient de variation est de 40%

L'utilisation de N par la culture est en moyenne de 72 % pour l'engrais alors qu'il n'est que de 45 % pour le lisier. L'efficacité de N du compost est très faible. Il existe également un effet sol sur l'utilisation de N du lisier et du compost.

Drainage de l'azote

La différence entre les pertes d'azote mesurées dans les lixiviats des colonnes sous les différents traitements et celles mesurées sous sols témoins donne une indication des pertes par lixiviation de l'azote provenant des produits appliqués. Seuls des nitrates ont été retrouvés dans les lixiviats, la forme ammoniacale n'a jamais été trouvée.

Tableau 12 : *Pertes moyennes d'azote (3 répétitions) par drainage sous sol nu et sous sol cultivé (en % des unités apportées)*

traitement	engrais		lisier		compost	
sol	nu	cultivé	nu	cultivé	nu	cultivé
LM	55	9	25	8	6	0
SP	60	13	37	0	0	2
PSL	51	21	22	11	13	13
moyenne	55	14	28	6	6	5

Les pertes nulles signifient que le sol témoin a drainé plus d'azote que le sol sous traitement

Les pertes moyennes sous sol nu (tous types de sols confondus) en provenance de l'engrais sont de 55 % de l'apport. Le reste est réorganisé et/ou dénitrifié au niveau du sol. Sous sol cultivé, ces pertes ne sont que de 14 % de l'apport. Pour le lisier les pertes par lixiviation sous sol nu sont de 28 % de l'apport et de 6 % sous sol cultivé. Ces pertes ont essentiellement lieu pendant la phase d'installation du gazon. L'azote du lisier doit subir de fortes réorganisation et/ou dénitrification au niveau du sol. Le sol joue donc un rôle épurateur non négligeable. Pour le compost, les pertes sont très faibles, sauf dans le cas de PSL où elles atteignent 13 % sous sol nu comme sous sol cultivé (tableau 12).

Vitesse de lixiviation

A partir des différentes courbes de lixiviation en fonction du temps, il est possible de chiffrer la moyenne de déplacement des nitrates en fonction du drainage et de la pluie. Les formes ammoniacales mettent de 3 à 3.5 semaines pour se nitrifier. Les nitrates se déplacent en profondeur dans les différents sols de 25 cm pour 100 mm d'eau de pluie efficace. En considérant que l'infiltration est constante sur toute la profondeur de sol, une pluie de 400 mm entraîne les nitrates à une profondeur de plus de 1 m. limite de l'enracinement de la plupart des cultures ; ils sont alors évacués vers la nappe.

Essai de bilan de l'azote

Les sols ont minéralisé 1.6 à 1.9 % de leur matière organique pendant 3 mois, ce qui peut représenter leur potentiel annuel de minéralisation sous culture. Le sol PSL présente une minéralisation plus continue dans le temps que les 2 autres sols. Les pertes sous sol cultivé (lixiviats) ainsi que les mobilisations par le gazon permettent d'établir un bilan d'utilisation de l'azote, le solde étant supposé dénitrifié ou réorganisé (tableau 13).

Tableau 13 : *Total d'azote retrouvé dans les eaux drainées (lixiviation moyenne) et dans le gazon cultivé (mobilisations azotées moyennes)*

trait.	engrais			lisier			compost		
sol	gazon	lixiviat	solde	gazon	lixiviat	solde	gazon	lixiviat	solde
LM	79	9	12	25	8	67	10	0	90
SP	71	13	16	64	0	36	15	2	83
PSL	64	21	15	43	11	46	34	13	53
moy.	72	14	14	44	6	50	20	5	75

l'azote retrouvé est ramené en % de N apporté, le complément à 100 (solde) est supposé réorganisé par le sol ou dénitrifié lors du transfert dans la colonne de sol

VII.2.3. Premières conclusions

L'interprétation suivante peut être donnée pour cet essai :

- Il n'y a pas de différence entre les 3 sols avec l'apport d'engrais : 14 % de l'apport est perdu ou réorganisé par la MO du sol.
- Pour le lisier, il semble y avoir de fortes différences entre sols : pour LM, 67 % semble perdu (dénitrifié) ou réorganisé, alors que pour SP, ce chiffre tombe à 36 % (PSL se situant entre les deux) ; mais le fort coefficient de variation ne permet pas d'interpréter les différences observées.
- Pour le compost, il existe également des différences entre sols : 90 % sont réorganisés dans le sol de LM ou simplement non minéralisés (matière organique stabilisée lors du compostage), alors que pour PSL, 53 % seulement sont réorganisés ou non minéralisés ; pour le sol PSL, la minéralisation de la MO du sol et du compost dure beaucoup plus longtemps.

Pour la valorisation agricole, deux résultats apparaissent importants :

- le lisier est moins bien utilisé par une culture qu'un engrais minéral, mais il subit moins de pertes par lixiviation (les formes ammoniacales doivent subir une dénitrification et une réorganisation plus importantes). Il existe cependant des différences entre sols.
- la dose de 200 N par ha apportée sur le gazon semble appropriée car elle génère peu de pertes par drainage.

L'expérimentation sur colonnes de sols remaniés donne rapidement et assez facilement des résultats. Il faudra cependant améliorer ce système et comparer ces résultats avec ceux obtenus sur des colonnes de sols non remaniés, car les vitesses de percolation et les paramètres de dispersion et de diffusion des solutés pourraient être différents.

VIII. Emergence d'un pôle de compétence "agriculture durable et environnement" au CIRAD de la Réunion

L'opération de recherche sur la gestion des effluents, financée pour partie par la C.O.R.D.E.T. a permis de compléter des approches existantes au CIRAD sur la protection de l'environnement : (i) en matière de lutte contre l'érosion grâce à l'expertise agronomique acquise depuis de nombreuses années, et (ii) plus récemment en matière d'aménagement de l'espace et de protection du paysage, notamment pastoral et forestier. Une réflexion d'équipe a ainsi pu démarrer en 1996 autour d'un projet de recherche fédérateur intitulé "gestion des espaces et des ressources renouvelables". Trois thématiques ont été développées et argumentées (Paillat *et al.*, 1996) à partir d'un constat commun, avec des objectifs partagés, tant scientifiques, que de pluridisciplinarité et de communication.

Plus récemment, compte tenu des interactions fortes entre les pratiques agricoles et l'environnement, la réflexion a été élargie à un second projet qui a pour objectif le développement plus particulièrement dans les Hauts, de systèmes diversifiés de production viables, pérennes et respectueux de l'environnement. Ce projet est constitué de deux composantes, l'une agronomique et l'autre socio-économique.

VIII.1. Constats pour une agriculture durable et le respect de l'environnement

L'agriculture, notamment celle des Hauts, connaît nombre de difficultés en raison de l'enclavement des structures de production, des contraintes de mise en valeur liées au relief, à la pluviométrie, au parcellaire, et de la faible rentabilité de certaines productions traditionnelles (géranium, canne à sucre dans les Hauts). Cette agriculture recherche des solutions viables sur le plan économique (productions adaptées au contexte physique et au marché) et permettant de pérenniser les exploitations. Si la viabilité est le premier critère recherché, la protection de l'environnement devient une caractéristique majeure de ces exploitations devant assurer leur reproduction.

En effet, les risques de détérioration de l'environnement à La Réunion sont nombreux et le milieu physique réagit souvent avec rapidité et ampleur, dans ce contexte insulaire où la topographie est particulièrement marquée, la pluviométrie exceptionnellement abondante et les sols et les écosystèmes en général très fragiles. Ces risques sont identifiables par l'érosion, la pollution et la dégradation générale des écosystèmes.

D'autre part, la "qualité" est de plus recherchée par les populations habitant La Réunion, ou pratiquant du tourisme sur l'île. Les acteurs du développement et les pouvoirs publics sont donc sensibilisés au maintien voire à l'amélioration de cette qualité de l'eau, des paysages, des produits agricoles et autres ...

De plus, les aspects réglementaires en matière d'environnement sont de plus en plus contraignants à travers les directives et règlements européens qui s'appliquent ou vont s'appliquer prochainement à La Réunion.

Face à ces constats, la recherche agronomique peut répondre à la demande en proposant des "outils" capables d'appréhender et/ou de résoudre les problèmes de gestion agricole de l'environnement. Il s'agit souvent de modèles biophysiques, sociaux (comportements) dont l'objectif est de déboucher sur des simulations. Ces dernières, utilisées comme outil de prospective ou d'évaluation des risques à plus ou moins longue échéance, devraient permettre aux acteurs de décider des actions à conduire en matière de protection de l'environnement tout en conciliant la promotion d'une agriculture plus durable.

VIII.2. Objectifs du pôle de compétence

Le pôle doit viser la construction de problématiques de recherche clairement identifiées sur la base de questions précises posées à la recherche. Un effort de formulation est donc nécessaire pour chacune des opérations de recherche qui concerne ce pôle. Cette formulation a été proposée sous la forme suivante : constats du problème, identification des demandes et des partenaires (qui ?, comment ?), problématiques de développement (quelles sont les positions des acteurs du développement ?), questions de recherche posées, méthodologies utilisées (Paillat *et al.*, 1996).

Il ne s'agit pas de présenter des opérations de recherche agronomique classiques qui auraient des retombées éventuelles positives sur l'environnement, mais bien de formuler des opérations avec comme problématique d'entrée, la durabilité des systèmes de production et l'environnement. Bien entendu, le champ d'action du C.I.R.A.D. reste en grande partie celui des pratiques des agriculteurs, acteurs incontestés de la gestion de l'environnement.

Le pôle doit permettre la constitution d'équipes et/ou l'articulation d'équipes existantes de deux manières : autour de thématiques communes (axes de recherche) et/ou autour de méthodologies communes à différents chercheurs. La complémentarité des compétences, notamment d'ordre disciplinaire (agronomie, pédologie, hydrologie, climatologie, gestion, économie, sociologie ...) doit permettre une synergie dans les différentes actions menées.

Le pôle doit ouvrir le C.I.R.A.D. à La Réunion vers un nouvel affichage. Celui-ci devrait permettre de mieux répondre aux demandes ou de mieux aider à construire les demandes avec nos partenaires (agriculteurs, ingénieurs et techniciens du développement, aménageurs, élus politiques ...). Cette dynamique en construction peut être un élément moteur pour la programmation des recherches du C.I.R.A.D. à La Réunion.

VIII.3. Caractérisation du pôle de compétence

A partir de ces objectifs, on peut caractériser globalement le pôle environnement par les notions de recherche systémique et de modélisation des phénomènes observés (physiques, chimiques, flux, transferts ...). Ces modélisations nécessitent des approches à différentes échelles (système sol-plante, parcelle, exploitation, localité, paysage, région, île), d'où la nécessité de mieux comprendre et raisonner les changements d'échelles. L'utilisation des modèles doit déboucher sur des simulations pour l'analyse et l'aide à la décision des acteurs de l'agriculture et de l'environnement.

Actuellement quatre thématiques de recherche (figure 17) semblent se distinguer au sein du pôle "agriculture durable et environnement" ayant respectivement pour objectifs principaux :

1- de mieux utiliser les ressources renouvelables (sol, eau, MO),
2- de réduire les pollutions en valorisant les déchets en agriculture,
3- de gérer les espaces en faveur de la biodiversité,
4- d'assurer une production agricole durable,

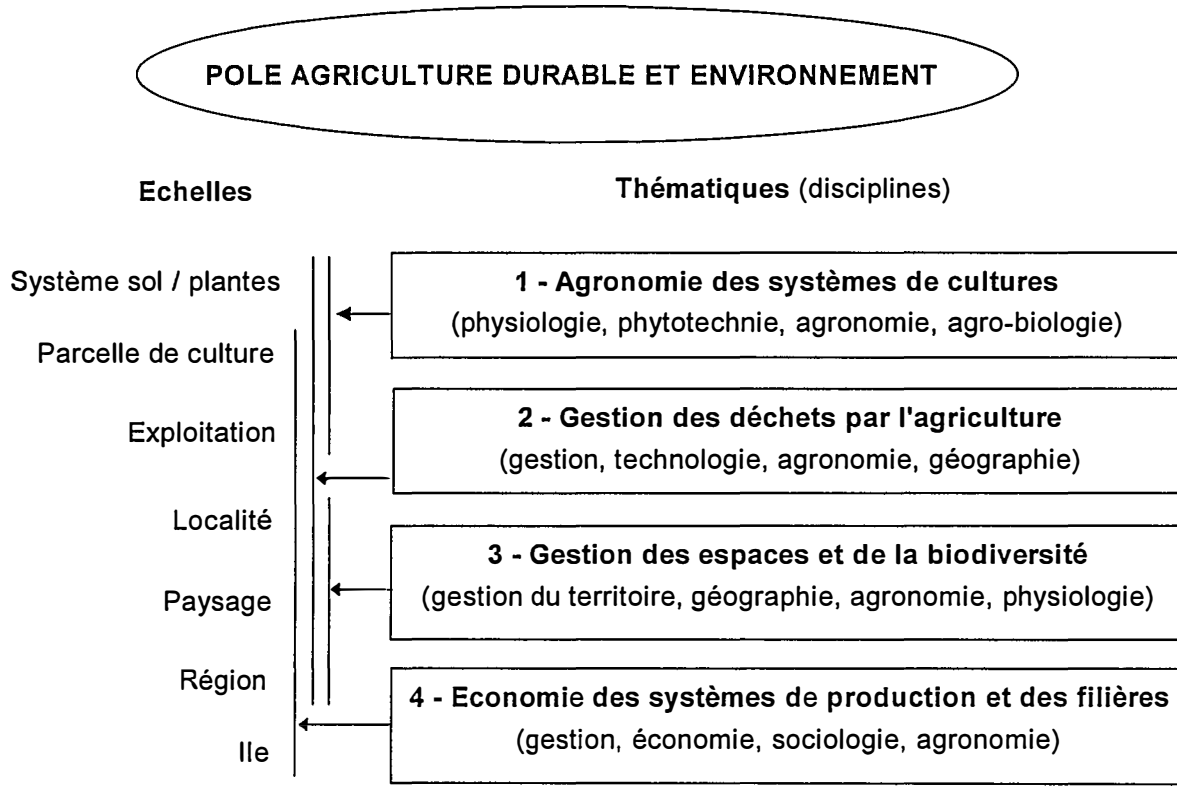


Figure 17 : *Schématisation du pôle "agriculture durable et environnement" avec les thématiques abordées, les disciplines mobilisées et les différents niveaux d'échelles impliqués*

IX. Conclusions et perspectives

L'analyse des pratiques a permis de mettre en évidence différents aspects de la gestion des effluents d'élevage par les éleveurs.

1- Les risques en matière d'environnement sont étroitement associés aux types d'exploitation. En cela, la typologie proposée est intéressante et renseigne sur la nature et l'importance des échanges de MO nécessaires pour assurer des transferts de fertilité entre exploitations.

2- Les trajectoires d'évolution des exploitations rendent compte d'une volonté d'intensification vers l'élevage hors sol ou vers le maraîchage. Cette volonté est cependant contrariée par la difficulté à écouler les effluents produits pour les uns et par la contrainte d'approvisionnement en MO de qualité pour les autres.

3- La gestion de la MO intervient à différentes échelles (parcelles, exploitations, localités, régions). La résolution des problèmes de gestion des effluents à chacune de ces échelles dépendra donc des acteurs intervenant et des relations entre eux : gestion individuelle et/ou collective.

4- Des bilans de matière peuvent être estimés à chacune des échelles retenues. Cependant, les matières organiques doivent être différenciées selon leur nature, en relation avec leur facilité d'emploi et les cultures. Un bilan en terme de circuits sec ou liquide a été proposé pour l'échelle régionale. Pour la localité, on peut aborder plus facilement le bilan par produit, voire par unités fertilisantes. Pour les exploitations, le bilan en terme d'utilisation selon les stratégies et représentations des agriculteurs est important. Enfin, au niveau des parcelles le diagnostic de fertilité et le bilan de fertilisation deviennent nécessaires.

En ce qui concerne la transformation des matières organiques, l'épandage des effluents reste la solution la moins coûteuse pour les usagers. L'agriculteur doit gérer ses effluents d'élevage, plus éventuellement ceux excédentaires de ses voisins, en optimisant les apports par rapport aux besoins des cultures, sans provoquer de pollution diffuse. La difficulté de valorisation des effluents doit aussi conduire au choix d'un procédé de traitement spécifique visant leur réduction à la source pour une optimisation des surfaces épandables.

Dans les zones à excédents, le traitement devient incontournable et urgent, notamment pour réduire la concentration en azote. Il permettra un mode de gestion amélioré, mais les différents sous-produits extraits doivent trouver une destination et un circuit de distribution adaptés, voire une commercialisation. Des stations de traitement expérimentales devraient voir le jour en 1998 pour répondre aux besoins d'éleveurs de ces zones.

Pour la valorisation agricole, les premiers résultats se résument en deux points principaux.

1- Le lisier est moins bien utilisé par la culture que l'engrais, mais il subit moins de perte par drainage. La forme ammoniacale de l'azote doit subir plus de pertes lors des phases de nitrification. La réorganisation de cette forme au sein de la MO du sol est sans doute meilleure. Il existe cependant des différences entre sols qu'il faudra mieux étudier.

2- La dose de 200 N par ha apportée sur le gazon semble appropriée, car elle génère peu de pertes par drainage, sauf pour le sol PSL pour lequel les drainages sont systématiquement supérieurs. Ceci peut s'expliquer par une minéralisation plus constante dans le temps, de sa MO et certainement des autres produits apportés.

L'expérimentation sur colonnes permet de mettre rapidement en évidence certaines particularités des sols. Cependant, le dispositif devra être amélioré pour prendre en compte les différences importantes de pousse du gazon (coefficients de variation élevés). Ce genre d'essai sera par la suite adapté pour répondre aux problèmes de transfert de solutés et aux questions sur le cycle de l'azote dans les systèmes sol-plante, l'objectif étant de modéliser les transferts de l'azote apporté par différents effluents. Des essais au champ sont installés parallèlement.

Pour la suite des travaux sur les effluents d'élevage, la modélisation en cours et les simulations des flux, des traitements et des valorisations possibles qui pourront en découler, permettront d'optimiser la gestion globale des effluents à l'échelle d'une localité ou à une plus grande échelle. Les modèles de gestion proposés devront être adaptables à différents contextes de production et d'utilisation d'effluents d'élevage.

Deux localités, Grand-Ilet avec la nécessité d'épurer fortement les lisiers par manque de surfaces épandables, et une localité du sud (Petite-Ile ?) avec un contexte de valorisation possible des produits issus des traitements, seraient concernées à terme par les études menées sur la caractérisation des flux d'effluents, la transformation des déchets, la valorisation agronomique, la modélisation et la simulation des transferts de matière organique.

Rapports édités dans le cadre du projet

Bourgeois S., 1995. *Valorisation agronomique des déchets à la Réunion*. Rapport de mission d'appui à S. Reynaud et M. Thiery, Institut national agronomique de Paris-Grignon, CIRAD, Paris, 6 p.

Chabalier P.-F., 1995. *Utilisation de la matière organique dans les sols de La Réunion*. Document CIRAD-CA, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 13 p.

Chabalier P.-F., 1997. *Etude du comportement de trois sols sous trois apports de fertilisants azotés - expérimentation en colonnes de sols remaniés*. Rapport CIRAD-CA-GEC, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 19 p. + annexes.

Chabalier P.-F., 1998. Traitement et épuration des déchets fermentescibles par l'agriculture. *In : rapport d'exécution des conventions 1997*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 4 p.

D'Aquino P., 1996. *Mission d'appui au projet CORDET gestion des effluents d'élevage : de la nuisance à la fertilité - Intégration de systèmes d'Information Géographique*. Rapport de mission CIRAD-SAR n° 69/96, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier, 35 p.

Farinet J.-L., 1995. *Valorisation agricole des déchets et effluents à La Réunion*. Rapport de mission CIRAD-CA-VER, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier, 18 p.

Fraboulet P., Jourde A., Paillat J.-M., 1998. *Etude du compostage du lisier de porc et de lapin sur différents types de supports carbonés en conditions tropicales*. Rapport CIRAD-TERA-ERE, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 20 p.

Guerrin F., 1997a. *Gestion agricole des effluents d'élevage : modélisation et simulation des flux de matières organiques*. Opération de recherche, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de la Réunion, 8 p.

Guerrin F., 1997b. *Modélisation de systèmes agro-écologiques pour l'aide à la gestion intégrée de l'agriculture réunionnaise et la préservation de l'environnement*. Proposition d'opération de recherche, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de la Réunion, 8 p.

Hélène B., 1996. *Mise en oeuvre d'un dispositif de respirométrie*. Mémoire de maîtrise de physiques et applications de l'Université de La Réunion, CIRAD, St Denis de La Réunion, 22 p. + annexes.

Hurvois Y., 1996. *Pôle environnement du CIRAD à La Réunion - analyse*. Note technique, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 8 p.

Hurvois Y., 1997. *Gestion des effluents d'élevage à La Réunion*. Rapport de mission CIRAD-CA-VER, Agence de l'eau Loire-Bretagne, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier, 19 p. + annexes.

Lorré M., Paillat J.-M., 1996. *Mise au point d'une méthode de détermination de la teneur en matière sèche d'un compost avec un four à micro-ondes*. Rapport CIRAD-SAR, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 17 p.

Mandret G., Fontaine O., 1996. Optimisation technique de la production fourragère. *In : rapport d'exécution des conventions 1995*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 4 p.

Mara T.-A., 1995. *Mise en œuvre d'un dispositif de respirométrie*. Rapport de maîtrise de physique et applications, Université de La Réunion, CIRAD, St Denis de La Réunion, 24 p. + annexes.

Nouroudine A.-T., 1995. *Evaluation du dégré de maturité des composts*. Rapport de maîtrise de chimie et biologie végétale, Université de La Réunion, CIRAD, St Denis de La Réunion, 63 p. + annexes.

Onaly A., 1997. *Evaluation de l'innocuité d'un amendement organique en conditions tropicales. Propositions de méthodes pour la détermination de seuils de maturité de composts produits à la Réunion*. Mémoire de maîtrise des sciences et techniques, Université de la Réunion, CIRAD, St Denis de la Réunion, 38 p. + annexes

Paillat J.-M., 1996a. Gestion des effluents d'élevage. *In : rapport d'exécution des conventions 1995*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 4 p.

Paillat J.-M., 1996b. *Programme de recherche CORDET 94DA51 - gestion des effluents d'élevage à La Réunion - rapport intermédiaire*. Rapport CIRAD-SAR, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 10 p.

Paillat J.-M., Fraboulet P., 1998. Gestion des effluents d'élevage. *In : rapport d'exécution des conventions 1997*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 6 p.

Paillat J.-M., Gallo J.-Y., 1996. *Analyse des flux de matières organiques dans la localité de Dos d'Ane*. Rapport CIRAD-SAR, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 38 p. + annexes.

Paillat J.-M., Légier P., Lorré M., 1996. *Mise en route d'une plate-forme de compostage - suivi technique*. Note technique CIRAD-SAR, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 3 p.

Paillat J.-M., Lorré M., 1997. Gestion des effluents d'élevage. *In : rapport d'exécution des conventions 1996*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 6 p.

Paillat J.-M., Perret S., Blanfort V., Chabanne A., Michellon R., 1997. Environnement : gestion des espaces et des ressources naturelles. *In : CIRAD Magazine, spécial rapport annuel 1996*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, pp 55-58.

Paillat J.-M., Perret S., Chabalier P.-F., Combres J.-C., Langellier P., Mandret G., Michellon R., 1996. Environnement : gestion des sols, de l'eau et des intrants. *In : CIRAD Magazine, spécial rapport annuel 1995*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, pp 55-58.

Paillat J.-M., Perret S., Tassin J., 1996. *Projet de pôle environnement du CIRAD à La Réunion*. Document interne, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 19 p.

Perret S., Fraboulet P., 1998. Gestion de la fertilité dans les exploitations horticoles des Hauts. *In : rapport d'exécution des conventions 1997*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 4 p.

Perret S., Lorré M., 1997. Gestion conservatoire des sols et de la fertilité dans les exploitations de polyculture des Hauts. *In : rapport d'exécution des conventions 1996*, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 4 p.

Pouzet D., 1996. *Projet de valorisation des déchets agricoles et urbains par la canne à sucre*. Rapport CIRAD-CA-CAS, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de la Réunion, 23 p.

Pouzet D., Chabalier P.-F., Légier P., 1997. Fertilité et fertilisation des sols réunionnais, application à la canne à sucre. *In : Panorama agricole et sucrier 1988-1997*, Association réunionnaise pour le développement de la technologie agricole et sucrière, St Denis de La Réunion, pp 30-38.

Reynaud S., 1995. *Diagnostic des pratiques agricoles pour une meilleure compréhension des transferts d'effluents d'élevage*. Mémoire d'ingénieur agronome, Institut national agronomique de Paris-Grignon, CIRAD, Paris, 58 p. + annexes.

Thiery M., 1995. *Mise au point d'une unité de compostage de déchets d'abattoir de volailles en zone de montagne à La Réunion*. Mémoire d'ingénieur ITIA, CNAM - INA-PG, Chambre d'Agriculture, St Denis de La Réunion, 57 p. + annexes.

Vimeux L., 1998. *Diagnostic des pratiques de gestion de la fertilisation organique dans les systèmes de polyculture-élevage des Hauts de La Réunion*. Mémoire d'ingénieur ISAB, Institut supérieur agricole de Beauvais, CIRAD, Beauvais.

Bibliographie complémentaire

Boscher M., Perret S., 1996. *La diversification dans les Hauts de St Paul (Réunion). Analyses des situations agricoles et stratégies de gestion des risques climatiques et de la mise en marché.* Rapport CIRAD-SAR, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 80 p. + annexes.

Caneill J., Capillon A., 1990. La destination des déjections animales en montagne : un enjeu pour les relations entre activité agricole et préservation de l'environnement. *In : Fourrages*, n°123, septembre 1990, Association Française pour la Production Fourragère, Versailles, pp 191-205.

Capillon A., Manichon H., 1991. Guide d'étude de l'exploitation agricole. *In : Relance agronomique*, INA-PG, Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture, 65 p.

Chabalier P. -F., Sentuc J., 1994. *Etude pédo-agronomique de la zone méridionale de la plaine de Dos d'Ane - Etude des impacts agronomiques possibles sur le périmètre de protection éloignée de la source Blanche (EDENA).* Rapport CIRAD-CA, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 21p.

Checkouri I., 1990. *Appréciation du pouvoir minéralisateur des sols réunionnais par différentes méthodes chimiques et biologiques.* Rapport CIRAD-CA, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de La Réunion, 39 p. + annexes

Corrot G., 1991. Mise au point d'une méthode de détermination du taux de matière sèche des fourrages avec un four à micro-ondes - Essai 91075. *In : Convention de recherche M.R.E. 90 G 0766*, Institut de l'Elevage, Paris, 20 p + annexes.

D'Amato N., 1989. *Etude hydrodynamique et performances d'un filtre à lit de paille.* Maîtrise du laboratoire d'ingénierie des procédés, Université des sciences et techniques du Languedoc, CIRAD, Montpellier, 24 p. +annexes.

Delattre F., 1996. *Analyse des pratiques et stratégies de gestion des stocks fourragers chez les éleveurs de bovins laitiers de La Réunion.* Mémoire d'ingénieur agronome, Institut national agronomique de Paris-Grignon, CIRAD, Paris, 54 p. + annexes.

Farinet J.-L., Forest F., 1993. *Filtration et méthanisation en continu sur support lignocellulosique renouvelé.* Rapport CIRAD-CA-VER. Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier.

Fontaine M., 1997. *Analyse des stratégies d'alimentation dans les systèmes d'élevage laitier des Hauts de la Réunion.* Mémoire d'ingénieur EITARC, Centre national d'études agronomiques pour les régions chaudes, CIRAD, Montpellier, 92 p. + annexes.

Forest F. , Farinet J.-L., 1993. *Le procédé d'épuration transfiltre.* Rapport CIRAD-CA-VER, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier

Gotin G., 1993. *Caractérisation hydrodynamique de supports naturels en vue de les employer en biofiltration.* Mémoire d'Ingénieur, Ecole nationale supérieure des industries agricoles et agro-alimentaires, CIRAD, Montpellier, 43 p. + annexes.

M.V.A.D., 1996. *Gisement de déchets organiques issus de l'agriculture et du milieu urbain.* Rapport technique, Chambre d'Agriculture, St Denis de La Réunion, 112 p.

Martiné J.-F., 1996. *Mosicas, modèle de fonctionnement de l'élaboration du rendement de la canne à sucre, paramétrage de la variété R570.* Rapport CIRAD-CA, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de la Réunion, 19 p. + annexes.

Michellon R., Perret S., 1995. *Conception de systèmes agricoles durables avec couverture herbacée permanente pour les Hauts de La Réunion.* Rapport CIRAD-CA, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, St Denis de la Réunion, 30 p.

Mustin M., 1987. *Le compost, gestion de la matière organique.* F. Dubusc (Ed.), Paris, 954 p.

Nicolardot B., Germon J.-C., Chaussod R., Catroux G., 1982. Une technique simple pour estimer la maturité des compost urbains. *In : Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets*, vol. 10, pp 118-120.

Paillat, 1995. *Etude de l'ensilage en balles enrubannées sous climat tropical d'altitude - Cas des fourrages tempérés et tropicaux récoltés à l'île de La Réunion.* Thèse de doctorat, Institut national agronomique de Paris-Grignon, CIRAD, Paris, 200 p. + annexes 100 p.

Perret S., 1992. *Etude des propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques.* Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, CIRAD, Montpellier, 279 p. + annexes.

Py F., Clariond A., 1989. *Influence de l'érosion et des techniques culturales sur les caractéristiques des andosols de la Réunion.* Mémoire d'ingénieur agronome, Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, CIRAD, Montpellier, 103 p.

Raunet, 1991. *Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole.* Document de synthèse CIRAD, Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, Montpellier, 437 p.

S.U.A.D., 1995. *Valorisation agricole de la vinasse sur canne à sucre. Opération pilote de 1992 à 1995.* Rapport technique, Chambre d'Agriculture, St Denis de La Réunion, 42 p. + annexes.

SOGREAH, 1996. *Etude de validation des procédés de traitement des déjections animales.* Rapport technique, SOGREAH, 100 p.

Ziegler D., Heduit M., 1991. *Engrais de ferme - Valeur fertilisante, gestion, environnement.* Document technique ITP - ITCF - ITEB, Institut technique des céréales et fourrages, Paris, 35 p.

Chercheurs, techniciens et employés ayant participé au projet

CHABALIER Pierre-François, agro-pédologue, docteur de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier.

GUERRIN François, biométricien, docteur de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

MANDRET Gilles, agronome, docteur du Muséum d'histoire naturelle de Paris.

PAILLAT Jean-Marie, gestion des systèmes fourragers et de l'élevage, docteur de l'Institut national agronomique de Paris-Grignon.

PERRET Sylvain, agro-pédologue et gestion des systèmes de cultures, docteur de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier.

POUZET Denis, agronome, ingénieur.

LEGIER Patrick, responsable du laboratoire d'analyses, technicien supérieur.

GAUVIN Lilian, responsable de l'atelier de mécanique, technicien.

MOUNIAPIN Floris, ouvrier d'atelier.

CARPANIN Josie, sécrétaire.

Stagiaires et volontaires de l'aide technique accueillis

1995 : GALLO Jean-Yves, ingénieur des travaux agricoles de Dijon (16 mois),
MARA Thierry, maîtrise de physique et applications de l'Université de La Réunion (2 mois),
NOUROUDINE Anly, maîtrise de chimie et biologie végétale de l'Université de La Réunion (2 mois).
REYNAUD Sylvie, ingénieur agronome de l'Institut national agronomique de Paris-Grignon (6 mois),
THIERY Marc, ingénieur des travaux agricoles CNAM - INA-PG, Chambre d'Agriculture de La Réunion (4 mois)

1996 : HELENE Brice, maîtrise de physique et applications de l'Université de La Réunion (2 mois).
LORRE Mathieu, ingénieur agronome de l'Institut national agronomique de Paris-Grignon (16 mois)

1997 : FRABOULET Patrice, ingénieur de l'Institut supérieur des techniques d'outre-mer (16 mois),
ONALY Assia, maîtrise des sciences et techniques, option biologie végétale, de l'Université de La Réunion (2 mois),
VIMEUX Laurent, ingénieur agricole de l'Institut supérieur agricole de Beauvais (6 mois).

1998 : BRET Laurent, DEA du laboratoire sciences de l'eau et de l'environnement continental de l'Université de la Réunion (6 mois)
CHOLLET Sophie, ingénieur agronome de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes (6 mois)
RENAULT Damien, ingénieur agronome de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier (16 mois).

Missions reçues par le projet

1995 : BOURGEOIS Serge, maître de conférences à l'Institut national agronomique Paris-Grignon.
FARINET Jean-Luc, chercheur au CIRAD-CA à Montpellier.

1996 : D'AQUINO Patrick, chercheur au CIRAD-SAR à Montpellier.
HURVOIS Yvan, ingénieur à l'Agence de l'eau Loire-Bretagne.
LEGAL Pierre-Yves, responsable de l'unité de recherche Géographie Agronomie Mécanisation du CIRAD-SAR à Montpellier

1997 : GUERRIN François, ingénieur d'études à l'Institut national de la recherche agronomique.
LEGAL Pierre-Yves, responsable de l'unité de recherche Géographie Agronomie Mécanisation du CIRAD-SAR à Montpellier

Table des matières

I. Introduction *2*
II. Problématique et questions de recherche *3*
II.1. Constat 3
II.2. Demande 3
II.3. Problématique de développement 4
II.4. Questions de recherche posées 4
II.5. Méthodologies mobilisées 7
III. Inventaire du gisement des déchets *7*
IV. Pratiques de gestion de la matière organique *9*
IV.1. Etude des pratiques à l'échelle régionale : cirque de Salazie 12
IV.1.1. Typologie de fonctionnement des exploitations 12
IV.1.2. Pratiques agricoles de gestion des effluents 13
IV.1.3. Modélisation des flux de matière organique 15
IV.2. Etude des pratiques à l'échelle locale : Dos d'Ane 16
IV.2.1. Typologie de fonctionnement des exploitations 16
IV.2.2. Pratiques de gestion de la matière organique 17
IV.2.3. Bilan des flux de matières organiques 19
IV.3. Etudes des pratiques à l'échelle de l'exploitation : région des Hauts de l'Ouest 21
IV.3.1. Démarche et méthodologie 21
IV.3.2. Caractérisation de l'équilibre demande / offre en matière organique au sein des exploitations.. 22
IV.3.3. Gestion de la matière organique 23
IV.3.4. Règles de planification des apports et ajustements 24
IV.4. Conclusion et poursuite des travaux sur l'analyse des pratiques 24
V. Modélisation des flux *26*
V.1. Modélisation à différentes échelles 26
V.1.1. Représenter la diversité des pratiques 26
V.1.2. Modéliser des scénarios de gestion 31
V.1.3. Problèmes particuliers du transport à La Réunion 31
V.2. Filières de production - traitement - valorisation 32
V.2.1. Conception de filières de production - traitement - recyclage des déchets d'élevage 32
V.2.2. Analyse de filières : simulation des flux 33
V.2.3. Evaluation d'impacts agricoles et environnementaux 33
VI. Transformation des déchets *34*
VI.1. Mise en oeuvre de différents procédés de traitement 34
VI.1.1. Compostage de déchets d'abattoir 34
VI.1.2. Suivis d'unités de compostage de lisier de porcs 35
VI.1.3. Proposition de nouveaux procédés 38
VI.2. Diagnostic de maturité des amendements organiques 40
VI.2.1. Suivi de la teneur en MS sur sites de compostage avec un four à micro-ondes 40
VI.2.2. Mise au point d'un dispositif de respirométrie 41
VI.2.3. Détermination de seuils d'innocuité des amendements 42

VII. Valorisation des déchets organiques par l'agriculture *44*
VII.1. La matière organique dans les sols de La Réunion 45
VII.2. Etude de la capacité d'épuration des sols de La Réunion 47
VII.2.1. Matériel et méthode 47
VII.2.2. Premiers résultats 48
Mobilisations de N par la culture 48
Drainage de l'azote 48
Vitesse de lixiviation 49
Essai de bilan de l'azote 49
VII.2.3. Premières conclusions 49
VIII. Emergence d'un pôle de compétence "agriculture durable et environnement" au CIRAD de la Réunion *50*
VIII.1. Constats pour une agriculture durable et le respect de l'environnement 50
VIII.2. Objectifs du pôle de compétence 51
VIII.3. Caractérisation du pôle de compétence 52
IX. Conclusions et perspectives *53*
Rapports édités dans le cadre du projet *55*
Bibliographie complémentaire *58*
Chercheurs, techniciens et employés ayant participé au projet *60*
Stagiaires et volontaires de l'aide technique accueillis *60*
Missions reçues par le projet *61*
Table des matières *62*

Résumé

La gestion des effluents d'élevage est devenue un enjeu important compte tenu des pollutions qu'ils peuvent engendrer. Les agriculteurs sont de plus en plus conscients des problèmes posés et sont demandeurs d'un appui en recherche et développement. A La Réunion, l'intérêt des apports de matières organiques pour améliorer la fertilité de sols fragiles conduit à privilégier le transfert des matières organiques rejetées par les élevages vers les productions végétales. Les recherches ont été menées sur plusieurs thèmes : (i) le diagnostic des pratiques et des stratégies des éleveurs et utilisateurs de matière organique, avec une approche des transferts entre exploitations, (ii) la caractérisation des amendements organiques et l'évaluation de procédés de transformation des déchets, et (iii) la valorisation agronomique des déchets.

L'analyse des pratiques a permis de mettre en évidence différents aspects de la gestion des effluents d'élevage : (i) les risques environnementaux sont associés aux types d'exploitation, (ii) les trajectoires d'évolution des exploitations rendent compte d'une volonté d'intensification contrariée par la difficulté à écouler les effluents, (iii) la gestion individuelle et/ou collective de la MO intervient à différentes échelles (parcelles, exploitations, localités, régions), et (iv) les matières organiques doivent être différenciées selon leur nature, en relation avec leur facilité d'emploi et les cultures. En ce qui concerne la transformation, l'épandage des effluents reste la solution la moins coûteuse pour les usagers. La difficulté de valorisation peut cependant conduire à un traitement visant une réduction à la source pour optimiser les surfaces épandables. Dans les zones à excédents, le traitement devient incontournable. Des stations de traitement expérimentales devraient voir le jour en 1998. Pour la valorisation agricole, les premiers résultats se résument en trois points principaux : (i) le lisier est moins bien utilisé par la culture que l'engrais, mais il subit moins de perte par drainage, (ii) la dose de 200 N par ha apportée sur le gazon semble appropriée car elle génère peu de pertes par drainage, et (iii) l'expérimentation sur colonnes permet de mettre rapidement en évidence certaines particularités des sols, l'objectif étant de modéliser les transferts de l'azote apporté par différents effluents.

Pour la suite des recherches, la modélisation des flux, des traitements et des valorisations possibles permettra d'optimiser la gestion globale des effluents à l'échelle d'une localité ou à une plus grande échelle. Les modèles de gestion proposés devront être adaptables à différents contextes de production et d'utilisation d'effluents d'élevage. Deux localités, avec des contextes de valorisation des effluents différents, seront concernées par les études menées sur la caractérisation des flux d'effluents, la transformation des déchets, la valorisation agronomique, la modélisation et la simulation des transferts de matière organique.

Mots clés :

déchets, élevage, valorisation, transfert, traitement, pollution, modélisation, climat tropical, milieu insulaire, La Réunion