

# Mise à jour de la carte des sols de l'île de la Réunion

## Démarche suivie et problèmes rencontrés

F. Feder<sup>(1)</sup> et G. Bourgeon<sup>(2)</sup>

1 CIRAD, UPR Recyclage et Risque, Saint-Denis, La Réunion, F-97408 France.

2 CIRAD, UPR Recyclage et Risque, Montpellier, F-34398 France.

### RÉSUMÉ

L'utilisation d'anciennes cartes pédologiques peut poser de nombreux problèmes d'interprétation ou de réactualisation, notamment pour construire des cartes thématiques appliquées aux préoccupations actuelles. Une étude sur l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe phréatique dans l'ouest de l'île de la Réunion nous a conduits à recenser et à évaluer les données disponibles sur les sols. À l'issue de ce recensement, l'analyse critique des cartes et données pédologiques existantes nous a montré qu'elles n'étaient pas directement utilisables pour notre étude et que cela tenait essentiellement à l'ancienneté des concepts pédologiques utilisés et des typologies/terminologies associées d'une part, à l'absence de données concernant des profils géoréférencés d'autre part. Nous avons donc réalisé une nouvelle prospection sur notre zone d'étude de 428 km<sup>2</sup> (soit 1/5 de l'île). Nous y avons identifié trente types de sols correspondant à des groupes de références (RSGs) de la WRB et à leurs subdivisions, et nous les avons regroupés en quatorze pédopaysages. Le haut du versant est marqué, jusqu'à 900 m d'altitude, par l'andosolisation. La podzolisation s'y superpose sous forêt entre 1600 et 1800 m. Le reste du versant est marqué par des teneurs en matière organique toujours fortes, allant en décroissant vers le bas. La saturation du complexe absorbant permet de distinguer une zone moyenne, où les Umbrisols dominent, d'une zone basse, domaine des Phaeozems et sols associés. À chaque tranche altitudinale correspond donc un type de sol bien développé auquel est en général associé un type incomplètement développé (Cambisol) présentant la même tendance pédogénétique. Depuis un demi-siècle, les progrès accomplis dans la connaissance et la classification des sols développés sur matériaux volcaniques en milieu tropical ainsi que ceux réalisés dans l'appréciation de l'âge des événements du volcanisme constituent deux facteurs d'explication de l'obsolescence rapide des anciennes cartes des sols dans le cas présenté ici. Certains des problèmes rencontrés pour cette étude se poseront probablement à nouveau lors de la réalisation du référentiel pédologique régional de l'île de la Réunion ainsi que pour ceux d'autres DOM.

### Mots clés

Cartographie, WRB, CPCS, sols tropicaux, Andosols.

**SUMMARY****UPDATING THE SOIL MAP OF RÉUNION ISLAND: Methodology and problems to be overcome**

When old soil maps are used for the preparation of thematic maps to answer present environmental concerns, many problems of interpretation and updating can appear. The assessment of the groundwater vulnerability on the western slope of la Réunion Island led us to review and evaluate the available data on soils. At the end of this census, the critical analysis of the existing soil maps and data showed that they were not directly utilizable for our study and that was primarily due to pedological concepts and associated classifications which are no more used on the one hand, and to the lack of georeferenced data on the other. We therefore carried out a new soil survey of our study area covering 428 km<sup>2</sup> (ca. 20 % of the total island area). We identified 30 types of soils corresponding to subdivisions of the reference groups (RSGs) of the WRB, which we have grouped into fourteen pedopaysages. The upper part of the slope is marked, from the top to about 900 m, by the process of andosolization. The process of podzolization is superimposed on it under forest between 1 600 and 1 800 m. The remaining part of the slope is characterized by large organic matter contents, decreasing downwards. The degree of saturation of the soil exchange capacity makes it possible to distinguish a mid-altitude zone, where Umbrisols dominate, from a lower zone, with Phaeozems and associated soils. To each altitudinal section thus corresponds a well developed type of soil associated with an incompletely developed type (Cambisol) presenting the same pedogenic tendency. Recent changes in the knowledge and classification of the soils developed on volcanic materials under topical climate, as well as progress in the dating of the volcanic events explain both the fast obsolescence of the old soil maps in the case presented here. Some of the problems encountered during this study will probably again arise during the completion of the Référentiel Pédologique Régional of la Réunion island (the regional computerized soil data base) and possibly for those of other overseas French territories.

**Key-words**

Soil maps, WRB, CPCS, tropical soils, Andosols.

**RESUMEN****ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE SUELOS DE LA ISLA DE LA REUNIÓN:****Enfoque seguido y problemas encontrados**

El uso de antiguos mapas pedológicos puede plantear numerosos problemas de interpretación o de actualización, en particular para construir mapas temáticos aplicados a las preocupaciones actuales. Un estudio sobre la evaluación de la vulnerabilidad del manto freático en el oeste de la isla de la Reunión condujo contabilizar y evaluar los datos disponibles sobre los suelos. Al final de este censo, el análisis crítico de los mapas y datos pedológicos existentes muestran que no están directamente utilizables para nuestro estudio y que eso tenía esencialmente, de una parte a la antigüedad de los conceptos pedológicos usados y de las tipologías / terminologías asociadas y de otra parte a la ausencia de datos que concierne perfiles geo-referenciados. Realizamos una nueva prospección en nuestra zona de estudio de 428 km<sup>2</sup> (o sea 1/5 de la isla). Identificamos treinta tipos de suelos que corresponden a grupos de referencias (RSGs) de la WRB y a sus subdivisiones, y agrupamos en catorce paisajes. La parte alta de la vertiente se marca, hasta 900 m por la andosolización. La podzolización se sobrepone bajo bosque entre 1 600 y 1 800 m. El resto de la vertiente se marca por contenidos en materia orgánica siempre elevados, que decrece hacia abajo. La saturación del complejo adsorbante permite distinguir una zona media, donde predominan los Umbrisoles, de una zona baja, dominio de los Phaeozems y suelos asociados. A cada nivel altitudinal corresponde entonces un tipo de suelo bien desarrollado al cual está, en general, asociado un tipo incompletamente desarrollado (Cambisol) que presenta la misma tendencia pedo-genética. Desde un medio-siglo, los progresos realizados en el conocimiento y en la clasificación de los suelos desarrollados sobre materiales volcánicos en medio tropical así que los realizados en la apreciación de la edad de los acontecimientos del volcanismo constituyen dos factores de explicación de la obsolescencia rápida de los antiguos mapas en el caso presentado aquí. Se plantearen algunos problemas encontrados para este estudio probablemente de nuevo al momento de la realización del Referencial Pédologico Regional de la isla de la Reunión así que para las de otros DOM.

**Palabras clave**

Cartografía, WRB, CPCS, suelos tropicales, Andosoles.

## INTRODUCTION

De nombreuses cartes de sols réalisées depuis plusieurs décennies l'ont été en appliquant des nomenclatures tirées de classifications basées sur des concepts dont la pertinence n'est plus reconnue par la communauté des spécialistes de science du sol. Les déterminations analytiques effectuées lors de la réalisation de ces cartes sont aussi souvent incomplètes au regard des critères requis aujourd'hui. Si, de plus, les profils types étudiés n'ont pas été localisés (géoréférencés selon les standards actuels), l'utilisation de ces anciennes cartes pose de nombreux problèmes d'interprétation ou de réactualisation dont cet article se propose de se faire l'écho dans le cadre d'un exemple précis : celui de l'île de la Réunion.

Cette île est située dans l'océan Indien ; d'une superficie totale de 2512 km<sup>2</sup>, elle est située à 800 km à l'est de Madagascar. Elle est constituée de deux massifs volcaniques : le piton des Neiges (3069 m) au nord-ouest, l'ancien volcan dont l'activité a cessé depuis 12 000 ans, et le piton de la Fournaise (2631 m) au sud-est, le volcan récent toujours actif. Le versant occidental du piton des Neiges, peu arrosé dans sa partie basse car « sous le vent », connaît néanmoins une forte expansion des surfaces agricoles liée du développement de l'irrigation. S'y est ajoutée, en zone de déprise agricole, une densification importante du tissu urbain avec prédominance de l'assainissement individuel. Cette évolution a conduit à une forte augmentation de la teneur en nitrates des nappes phréatiques qui est passée en vingt ans de quelques mg.l<sup>-1</sup> à 30 mg.l<sup>-1</sup> (Payet, 2005).

Dans le cadre d'un projet financé par le ministère de l'Outre-Mer et la Diren de l'île de la Réunion, nous devons réaliser, sur un secteur de 428 km<sup>2</sup> situé sur le versant ouest du piton des Neiges, une évaluation de la vulnérabilité de la nappe phréatique aux pollutions par les nitrates transitant par le sol et le sous-sol. Ce secteur représente donc un peu moins de 20 % de la superficie totale de l'île et son centre a pour coordonnées 21°00' de latitude sud et 55°20' de longitude est (figure 1). Comme l'ont montré d'autres études sur des sujets similaires (Batjes, 2000 ; Gogu et Dassargues, 2000 ; Koller *et al.*, 2004 ; Mendoza et Barmen, 2006), le sol est le premier compartiment à prendre en compte pour ce type d'évaluation, puis vient la zone non-saturée et enfin l'aquifère. Dans le contexte réunionnais, volcanique et tropical, il apparaissait indispensable de tenir plus particulièrement compte de la capacité des différents sols à retenir les nitrates (sols aux propriétés andiques et sols à charges variables) (Feder et Findeling, 2007).

Nous avons donc été amenés à faire un point précis des possibilités d'utilisation des études pédologiques existantes avant de décider, assez rapidement, de refaire une carte des sols. Ce sont des éléments de notre réflexion sur la possibilité de réactualiser d'anciennes études que nous présentons ici

car ce problème dépasse certainement le cadre géographique réunionnais. Les étapes de la démarche que nous avons suivie –analyse des données existantes, puis récolte et mise en forme de nouvelles données jusqu'à la réalisation d'une nouvelle carte des sols– serviront de trame à cet article. La carte de vulnérabilité de la nappe ne sera pas présentée, elle n'est en fait qu'un dérivé de la carte des sols, qui reste le document scientifique de base pouvant être utilisé pour répondre à d'autres problèmes que celui des nitrates.

## DONNÉES EXISTANTES SUR LES SOLS DE L'OUEST DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

### Origine et nature des données existantes

La couverture pédologique de l'île a été étudiée à diverses échelles et par différents auteurs depuis 1960. Pour la zone qui nous intéresse, le versant occidental du piton des Neiges, on peut mentionner par ordre chronologique, la carte de Riquier et sa notice (1960a et b), l'étude détaillée d'une climatoséquence par Zebrowski (1975), puis les cartes de Raunet (1988, 1989 et 1991a) et son ouvrage de synthèse (Raunet, 1991b).

Ces trois auteurs s'accordent pour reconnaître que les sols sont distribués selon une séquence altitudinale de grands types génétiques. En fait, cette séquence est aussi climatique car, avec l'augmentation de l'altitude, on note une baisse des températures moyennes (0,7 °C tous les 100 m), de l'ensoleillement ainsi qu'une augmentation de la pluviosité annuelle. Les conditions climatiques du littoral, 24 °C et 800 mm.an<sup>-1</sup>, contrastent ainsi fortement avec celles des sommets, 10 °C et 1700 mm.an<sup>-1</sup>.

Les trois auteurs précités considèrent les termes les plus évolués de la couverture pédologique, pratiquement tous les sols pour Riquier (1960a et b), et ceux situés vers le bas de la séquence pour les deux autres, comme des sols ferrallitiques au sens que l'on donnait à ce terme dans les années soixante et qui sera repris dans leur définition par l'ancienne classification française (Aubert et Ségalen, 1966 ; CPCS, 1967). Il s'agissait donc pour eux de sols où l'altération des minéraux primaires était poussée (la définition précisait lesquels et spécifiait altération complète), et la formation de minéraux secondaires tels que kaolinite, hydroxydes d'alumine et oxy-hydroxydes de fer, formation vérifiable à l'aide de techniques minéralogiques et appréciable par le calcul du rapport silice / alumine (dit rapport Ki) sur les résultats de l'analyse triacide alors couramment pratiquée.

Pour les sols qu'il qualifie de ferrallitiques et qui couvrent donc selon lui une très grande partie de l'île, Riquier (1960a et b) se base sur les valeurs du rapport Ki qui sont toujours

très inférieures à 2. Il en déduit un degré de ferrallitisation croissant avec l'altitude sans vérification par des analyses minéralogiques, rarement pratiquées à l'époque à laquelle son étude a été réalisée. Les profils étudiés par Riquier peuvent être considérés comme géoréférencés, car indiqués sur sa carte (1960a). Lorsque Riquier rédige sa carte et son rapport, la géologie de l'île de la Réunion vient d'être étudiée par Bussière (1957 et 1958) qui suggère un âge de -5 à -2 millions d'années (MA) pour les laves du versant ouest du piton des Neiges et n'y signale aucun recouvrement cendreux. Cet âge important de la roche était compatible avec le développement des sols ferrallitiques épais à altération poussée. Replacée dans son contexte, l'étude de Riquier est irréprochable, elle répondait aux exigences de qualité du moment.

Zebrowski (1975), sur la séquence qu'il étudie entre Saint-Paul et la crête du cirque de Mafate (trait blanc sur la carte de localisation, *figure 1*), précise le vocabulaire qu'il utilise pour qualifier les sols réunionnais en commentant les différents résultats des analyses réalisées sur onze profils dont seuls quatre sont géoréférencés, pour les autres le créneau altitudinal est donné. Pour lui, un sol est ferrallitique (type I de sa séquence s'étendant entre 350 et 650 m d'altitude et type II entre 650 et 900 m) s'il présente, en plus d'un rapport Ki faible (compris entre 0,8 et 2,0), une réaction au test du  $pH_{NaF}$  nulle (type I) ou très faible (type II). À partir de 900 m d'altitude, il identifie des Andosols (type III) caractérisés par une vive réaction au test du  $pH_{NaF}$ , mais qui présentent en outre un rapport Ki très faible ( $\ll 1$ ) ; ces sols sont présents jusque vers 1500 m, altitude à partir de laquelle des Podzols (type IV) prennent le relais. Son étude bénéficie des datations effectuées sur les roches par McDougall (1971) qui donnent un âge compris entre -250 000 et -210 000 ans pour les laves de sa séquence, donc un rajeunissement considérable par rapport aux connaissances antérieures. Ceci ne l'amène cependant pas à s'interroger sur la pertinence de l'appellation ferrallitique qui s'appuie une fois encore sur les valeurs du rapport Ki et sur des analyses minéralogiques indiquant la présence de gibbsite à partir de 650 m d'altitude et jusque dans les Andosols du haut ; plus bas, les minéraux phylliteux sont constitués d'halloysite et de métahalloysite. Zebrowski (1975) n'identifie pas non plus les recouvrements cendreux que Bertrand (1972), qui l'avait précédé, signalait bien dans son étude des sols des stations de la recherche agronomique de l'île de la Réunion (station des Colimaçons pour la zone qui nous intéresse). Précisons encore qu'il ne propose aucun type intermédiaire entre sols ferrallitiques et Andosols.

Ce ne sera pas le cas de Raunet (1988) que les nécessités de sa cartographie amènent à créer de nombreuses unités pour lesquelles il utilise des termes de la classification CPCSC. Pour une séquence équivalente à celle étudiée par Zebrowski (1975), il distingue de bas en haut des couronnes altitudinales

successives : affleurements rocheux associés à des poches de Vertisols (100 – 150 m), sols bruns ferruginisés ou non (150 – 550 m), sols bruns andiques (550 – 700 m), Andosols désaturés non perhydratés chromiques (700 – 1200 m), Andosols désaturés perhydratés (1200 – 1800 m) puis Andosols vitriques (au dessus de 1800 m). Il n'indique pas de Podzols, mais des Andosols désaturés à mascareignite (1600 – 1800 m). Enfin, les sols ferrallitiques ne sont plus représentés qu'au nord et au sud de notre zone d'étude sur des coulées d'océanites récentes de la phase II (i.e. les plus anciennes roches affleurantes du volcanisme réunionnais – Quaternaire ancien). Sur ses cartes plus détaillées, Raunet (1989 et 1991a) différencie en outre des types de sols différents à moyenne altitude (< 350 m) selon qu'ils se situent sur des coulées de la phase III (qui correspondent à des hawaïtes datées d'environ -350 000 à -250 000 ans et qui sont dites « pintade » en raison des cristaux de plagioclases blancs qui contrastent avec la pâte grise) ou des coulées de la phase IV (mugéarites dont l'émission a eu lieu entre -230 000 et -70 000 ans). Les sols, qu'il qualifie de « ferrallitiques » sur roches « pintade », passent latéralement à des sols bruns ferruginisés sur laves plus récentes.

## Analyse critique de ces données

On note, d'un auteur à l'autre, d'importantes variations dans l'appréciation de la distribution des sols sur l'île et dans les termes qu'ils utilisent pour les décrire.

Ainsi, en 1960, Riquier nommait « sols ferrallitiques beiges » ceux qui seront ensuite qualifiés d'Andosols et reconnaissait déjà des sols à mascareignite. On peut aujourd'hui expliquer cette position singulière en notant qu'en 1960 la roche mère était supposée uniformément ancienne et les connaissances sur les sols formés sur cendres volcaniques étaient encore très embryonnaires. En 1960, le terme ando, d'origine japonaise, commençait à être popularisé après la publication de la 7<sup>th</sup> Approximation (USDA, 1960) avec la reconnaissance des Andepts comme une sous-catégorie (sous-ordre) des sols peu évolués créée pour des sols contenant au moins 60 % d'allophanes tout en signalant « measures of allophane percentages are very rough » (les déterminations des pourcentages d'allophanes sont très grossières). Aujourd'hui, il n'est pas aisé d'expliquer pourquoi Riquier (1960a et b) n'a pas employé ce vocabulaire alors que dans son tableau comparatif des classifications (Riquier 1960b, page 20), il suggérait que les sols ferrallitiques beiges de l'île de la Réunion pouvaient être corrélés aux sols ando de Madagascar.

L'étude de Zebrowski (1975) va constituer ensuite une avancée majeure puisqu'il reconnaît les Andosols grâce notamment au test du  $pH_{NaF}$ . D'autres aspects intéressants de l'étude de Zebrowski (1975) sont les déterminations minéralogiques qui recourent les interprétations des analyses

au réactif triacide et l'attention qu'il porte à la répartition de la matière organique dans les sols du versant. Il identifie ainsi assez bien la zone où s'exerce la podzolisation en mettant en évidence une redistribution importante des acides fulviques, mécanisme qui se retrouve, bien qu'amorti, dans les premiers Andosols sous les Podzols.

Après cela, les cartographies de Raunet (1988, 1989 et 1991a) préciseront encore les choses. Il est assez curieux de constater que cet auteur et Zebrowski (1975), travaillant sur le même terrain, utilisant un corpus de connaissances scientifiques très voisin et notamment la même classification des sols, arrivent finalement à des résultats assez divergents sur la répartition des différents types de sols. Ainsi Raunet (1988, 1989, 1991a et b) :

- refuse d'utiliser le terme Podzol et parle de sols à mascareignite ; ce faisant il privilégie la mise en place d'un matériau constitué de phylolithes sur le mécanisme de redistribution de la matière organique dans le profil. Cette prise de position constitue un retour en arrière vers celle de Riquier (1960a et b) et est en désaccord avec les règles de la classification à laquelle il se réfère ;

- limite considérablement l'étendue des sols ferrallitiques en s'appuyant sur des données géologiques précises et, contrairement à ses prédécesseurs, n'utilise pas les valeurs prises par le rapport Ki pour porter son diagnostic ;

- fait descendre la limite inférieure des Andosols jusqu'à 550 m alors que Zebrowski (1975) la fixait à 900 m.

Sur ce dernier point, dont nous mesurerons ci-après toute la portée pratique, nous pensons qu'il s'agit là des conséquences d'interprétations différentes du test du  $pH_{NaF}$ . La règle qui semblait prévaloir consistait à considérer comme riches en substances amorphes les sols qui présentaient une forte augmentation de pH au bout de deux minutes (la phthaléine du phénol virant au rouge si le test était fait avec cet indicateur ou le pH dépassant 9,4 si l'on utilisait un pH-mètre). Des variantes ont été introduites, notamment par Zebrowski (1975) qui considérait le développement de la couleur rouge en vingt secondes comme caractéristique d'un Andosol et l'obtention d'une couleur rose au bout de deux minutes comme indicatrice de propriétés andiques sans plus.

Signalons enfin que les cartes de Raunet (1988, 1989, 1991a) sont de nature morpho-pédologique, et non strictement pédologique. Elles lui ont permis de représenter très précisément les ravines : ce mot revêt un sens particulier à la Réunion où il désigne des entailles profondes isolant de grands panneaux de lave de types « planèzes » ; elles sont limitées par des parois rocheuses particulièrement abruptes ne portant aucun sol développé. Ces ravines, souvent sèches, notamment dans l'ouest de la Réunion, connaissent des crues. Nous

conserverons les « ravines » et « planèzes » de Raunet ainsi que les quatre subdivisions principales des planèzes qu'il retenait et qui nous semblent bien adaptées à la description du milieu et à sa cartographie. Ainsi, nous distinguerons les milieux de haute altitude, les hautes planèzes bosselées, puis les moyennes planèzes et les extrémités de planèzes à topographie ondulée pour ces deux derniers ensembles (Raunet, 1988).

## Conclusions à cette analyse

Le document cartographique le plus détaillé disponible, donc a priori le plus adapté à notre étude de vulnérabilité, est constitué par les cartes au 1:10 000 du littoral ouest de Raunet (1989 et, partiellement, 1991a). Ces cartes sont de type morpho-pédologique comme cela vient d'être expliqué. Elles comportent des limites pédogénétiques qui proviennent d'un système taxonomique (CPCS, 1967) peu précis, puisque nous avons vu que sa mise en œuvre par deux auteurs différents pouvait aboutir à des résultats assez différents, et aujourd'hui obsolètes. En outre, ces cartes ne s'appuient pas sur un réseau d'observations dûment géoréférencées et elles ne couvrent que la partie basse de notre zone d'étude. Les actualiser en les complétant pour le haut du versant nous a semblé impossible pour les raisons suivantes :

- ces cartes au 1:10 000 et la carte générale au 1:50 000 (Raunet, 1988) n'ont pas la même légende et les différences ne sont pas du type de celles que l'on attend entre des cartes dressées par un même auteur sur une même zone (pour les parties communes). Entre les deux cartographies, les interprétations de l'auteur ont évolué et dans son ouvrage de synthèse, Raunet (1991, page 139) explique comment il a été amené à re-qualifier de « fersiallitiques » certains sols identifiés d'abord comme « bruns » sur sa carte générale ;

- nous avons déjà signalé que la définition et la délimitation des Andosols et autres sols à propriétés andiques sur ces cartes posaient problème. Ceci représente un inconvénient majeur dans le cadre de notre étude appliquée car un sol andique et un autre non-andique ne vont pas avoir le même effet sur la rétention d'un polluant, notamment si cela concerne un polluant anionique comme les nitrates ;

- pour les deux types de cartes, l'absence d'observations géoréférencées accompagnées d'analyses interdisait en outre de repartir des données de base pour « reclasser » des profils de référence selon des critères actuels des classifications internationalement reconnues aujourd'hui.

Si l'on considère maintenant l'ensemble des données existantes, cartes et toposéquence, indépendamment de la question appliquée qui nous était posée, on constate que l'amélioration de la connaissance de la couverture pédologique de l'île de la Réunion a été fortement conditionnée par les progrès de l'exploration géologique de l'île, notamment par les datations

des phases du volcanisme, ainsi que par l'évolution propre à la science des sols, à ses méthodes d'analyses et à ses concepts. Les sols ont été d'abord considérés comme résultant d'un seul type de pédogenèse, la ferrallitisation. Dans un second temps, l'andosolisation est venue lui disputer la partie haute du versant. Avec Raunet (1988 et 1989), l'extension des sols ferrallitiques a été réduite à son minimum car il ne s'est pas appuyé sur les valeurs du rapport  $K_i$ , mais surtout, pensons-nous, en raison d'une incompatibilité de plus en plus flagrante entre âge de roches d'une part, et possibilité que la ferrallitisation en ait affecté une épaisseur importante, d'autre part. Nous pouvons aussi imaginer que c'est l'interprétation des valeurs du rapport  $K_i$ , adaptée aux zones de socle, mais moins bien adaptée aux sols développés sur d'autres roches (Pédro, 1966; Claisse, 1968), qui a conduit Riquier et Zebrowski à des diagnostics que l'on peut aujourd'hui considérer comme erronés.

Aujourd'hui la ferrallitisation, concept hérité de la latéritisation, a disparu des systèmes modernes de classification en même temps que disparaissait l'analyse triacide du catalogue des laboratoires. À propos de l'évolution des classifications, on doit saluer la perspicacité de G. Aubert, l'un des pères de la classification française, quand il écrivait dans son introduction à la classification des sols ferrallitiques (Aubert, 1966) : « La classification actuelle est, sans aucun doute, fondée trop largement sur les caractères minéralogiques des horizons moyens ou profonds et même du matériau originel du sol, souvent acquis depuis des temps très reculés. Elle ne fait pas intervenir, ou seulement dans quelques cas trop rares, les propriétés –capacité d'échange, degré de saturation– du complexe absorbant... ».

À l'issue de cette étude critique de l'existant, nous avons décidé de faire une nouvelle prospection alimentant une base de données pédologiques géoréférencées et permettant de refaire une carte des sols en suivant un système taxonomique moderne laissant peu de place aux interprétations personnelles. En plus des éléments de géomorphologie signalés plus haut, nous reprendrons des études précédentes (Raunet, 1988, 1989 et 1991a) la distinction des différentes phases du volcanisme local; nous en reprendrons aussi les contours et contenus d'unités telles que les ravines, le cordon littoral, les formations alluviales, les cônes volcaniques récents et l'étang de Saint-Paul en les adaptant à la classification choisie.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Acquisition et mise en forme de nouvelles données

Notre effort a porté sur la caractérisation des sols des planètes (i.e. des pentes régulières du versant), caractérisation aussi complète que le nécessitaient et le permettaient la durée

et le budget de notre projet. Afin de refaire une carte des sols du versant selon des principes rigoureux et des normes actualisées, nous avons réalisé une nouvelle prospection comportant l'ouverture, la description et l'analyse complète de 70 fosses de référence pour notre secteur de 428 km<sup>2</sup>. 175 sondages à la tarière et quelques fosses partiellement analysées sont venus compléter l'information tirée de l'étude des fosses principales.

Pour chacune des 70 fosses de référence, une description complète a été réalisée et chaque horizon a fait l'objet de deux prélèvements. Pour la mesure de la densité apparente, les échantillons ont été prélevés à l'aide des cylindres de volume connu (NF X 31-501, AFNOR 1992) à raison de trois répétitions par horizon. Ils ont ensuite été pesés humides, puis séchés à l'étuve à 105 °C afin de déterminer leur teneur en eau au moment du prélèvement. Le second prélèvement de sol a été séché à l'air (pendant deux semaines environ) avant d'être broyé et tamisé à deux millimètres à l'aide d'une passoire à trous ronds (NF ISO 11464 X31-412, AFNOR 1994).

Une première série des analyses a été réalisée au laboratoire de la station du Cirad de la Bretagne (certifié ISO 9001 par l'AFAQ) à Saint-Denis de la Réunion: mesure du  $pH_{eau}$ , du  $pH_{KCl}$  et de la conductivité électrique (NF ISO 10390 X31-117, AFNOR 1994), mesure du  $pH_{NaF}$  (protocole 4C1a1a1a-b1, Soil Survey Staff, 2004). Ce même menu d'analyses a été appliqué à la plupart des échantillons prélevés à la tarière. La seconde partie des analyses a été réalisée par le laboratoire d'analyse des sols du Cirad à Montpellier certifié ISO 9001 depuis 2003 par l'Afaq. Les taux de carbone organique et d'azote total ont été déterminés à l'analyseur élémentaire (Thermoquest NC2001 Soil). Les mesures de la capacité d'échange cationique (CEC) et de teneurs bases échangeables ont été réalisées selon la méthode à l'acétate d'ammonium 1 M tamponné à pH 7. L'acidité d'échange a été mesurée après extraction au KCl 1 N. La méthode de Blakemore a été suivie pour évaluer la rétention du phosphore (protocole 4D8a1a-b1, Soil Survey Staff, 2004). Les quantités de fer, d'aluminium et de silicium extraites par dissolutions sélectives à l'oxalate d'ammonium à pH 3 et au CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) ont été dosées par ICP-OES (Varian Vista équipé d'un détecteur CCD). La densité optique de l'extrait l'oxalate a été mesurée (protocole 4G2a2a1, Soil Survey Staff, 2004) pour servir d'indicateur de podzolisation. La granulométrie en cinq fractions a été réalisée suivant la méthode à la pipette après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée et dispersion par l'hexamétophosphate de sodium. La dispersion a parfois été améliorée par un traitement aux ultra-sons (appareil Vibracell 75041, AGTT-00366 de 750 W, équipé d'une sonde de 13 mm et utilisé à 75 % de sa puissance). La présence de matériel amorphe dans une grande partie des sols du versant gêne la réalisation d'analyses granulométriques (problème récurrent dans cette situation) et, par voie de conséquence

l'identification d'horizons d'accumulation d'argile (horizons argiques dans la WRB) et des groupes de sols qui sont conditionnés par leur présence. À un degré moindre, elle est aussi gênante pour l'attribution des suffixes texturaux « clayic » ou « siltic » qui ne peut se faire que sur la base des impressions tactiles de terrain, sans croisement avec les résultats de l'analyse granulométrique. Pour cet article, nous ne proposons aucun suffixe, mais dans les documents plus complets qui accompagnent la carte, des suffixes sont proposés; ils sont hétérogènes (suffixes texturaux moins fiables quand l'analyse granulométrique n'a pu être faite).

## RÉSULTATS

La carte et les résultats d'analyses constituent les deux grands types de résultats obtenus à l'issue de cette étude. Pendant son déroulement, l'acquisition des données analytiques et la réalisation de la carte ont progressé en parallèle et par étapes: réalisation et analyse d'une toposéquence, puis d'un secteur de référence et enfin étude de la totalité de la zone. Nous présenterons néanmoins séparément les deux types de résultats en commençant par la carte et ses unités; elles constitueront ensuite un cadre logique pour une sélection de résultats analytiques.

### La carte des pédopaysages et sa légende

Pour la représentation cartographique de la zone étudiée, nous avons distingué quatorze pédopaysages correspondant à autant d'unités cartographiques (*légende de la figure 1*). Les dix premières unités se répartissent selon les quatre grandes zones altitudinales retenues de haut en bas du versant, quatre autres unités sont indépendantes de ce gradient altitudinal. La *figure 1* présente cette carte des pédopaysages sur un fond constitué du réseau routier, du bâti et des courbes de niveau. Cette carte a été réalisée pour une publication au 1 : 100 000. La localisation des fosses correspondant aux profils-type (*tableaux 1 et 2*) est indiquée sur la carte par des triangles noirs.

Par construction, une unité de pédopaysage peut regrouper plusieurs unités typologiques de sols; elle le fait sur la base d'une proximité géographique au sein d'un ensemble géomorphologique et d'une certaine uniformité d'utilisation, ou de mise en valeur. Corrélativement, il n'est pas exclu a priori qu'une unité typologique puisse se retrouver dans plusieurs unités de pédopaysage, mais cela reste exceptionnel, surtout en présence d'un gradient climatique aussi fortement exprimé qu'à l'île de la Réunion. Il est par ailleurs possible qu'une unité de pédopaysage ne soit composée essentiellement que d'une seule unité typologique de sols; c'est le cas des unités cartographiques 2 et 9 de notre étude.

Nous avons retrouvé et précisé les éléments de la toposéquence signalés par les études précédentes (carte et légende). À chaque tranche altitudinale correspond un type de sol bien développé auquel est en général associé un type incomplètement développé (Cambisol) présentant la même tendance pédogénétique. L'utilisation d'un référentiel comme la WRB apporte un réel progrès car la liste des préfixes<sup>1</sup> proposés permet de très bien rendre compte de cette distribution des sols. La CPCS ne le permettait guère sauf à « inventer » des sous-groupes sur la base de définitions personnelles et il n'est pas certain que la Soil Taxonomy offre les mêmes facilités: les sous-ordres des Inceptisols (sols peu évolués dans ce système) étant, par exemple, identifiés par le pédoclimat et non par des pédogénèses en devenir.

Le haut du versant est marqué, jusqu'à 900 m, par l'andosolisation. La podzolisation s'y superpose sous forêt entre 1 600 et 1 800 m. Elle est certainement facilitée par l'existence d'une couche de phytolithes issus d'une végétation non actuelle de bambous (*Nastus borbonicus*) comme l'a montré Alarcon (1995); cependant, elle correspond bien au développement de véritables horizons spodiques sous l'effet de la migration de composés organiques comme l'indiquait déjà Zebrowski (1975). Nous retrouvons aussi une limite basse de l'andosolisation (900 m) comparable à celle que proposait Zebrowski (1975) et nettement plus haute que celle de Raunet (en moyenne 700 m).

Le reste du versant est marqué par des teneurs en matière organique toujours fortes, mais qui vont en décroissant vers le bas. C'est la saturation du complexe absorbant qui permet de distinguer une zone moyenne, où les Umbrisols dominent, d'une zone basse, domaine des Phaeozems et sols associés.

### Caractéristiques analytiques des principaux types de sols rencontrés

Les observations et analyses des fosses de référence (70) et des sondages à la tarière (175) nous ont permis d'identifier trente types de sols correspondant à des groupes de références (RSGs) de la WRB (IUSS Working Group WRB, 2007) et à leurs subdivisions par des qualificatifs préfixes et suffixes. Nous

<sup>1</sup> Dans notre étude, nous utilisons plusieurs préfixes: pour les non-Andosols, le préfixe andic (an) indique que les cinq propriétés andiques sont respectées au sein d'une ou de plusieurs couches sur au moins 30 cm d'épaisseur dans le premier mètre de sol. Pour les Andosols, le préfixe silandic (sn) implique, en plus, que la quantité de silice extractible à l'oxalate d'ammonium à pH 3 soit supérieure à 0,6 %; le préfixe vitric (vi) s'applique notamment lorsque la présence de verres volcaniques est supérieure à 5 %. Pour la plupart des groupes de référence, le préfixe leptic (le) signifie que la roche sous-jacente non-altérée apparaît à moins d'un mètre de la surface du sol. Enfin, le préfixe haplic (ha) est utilisé lorsqu'aucun des autres préfixes prévu pour le groupe de référence identifié ne s'applique (préfixe par défaut). Ce ne sont ici que des rappels sommaires, pour les définitions complètes, se référer au document de l'IUSS Working Group WRB (2007).

Figure 1 - Carte des sols.

Figure 1 - Soil map.

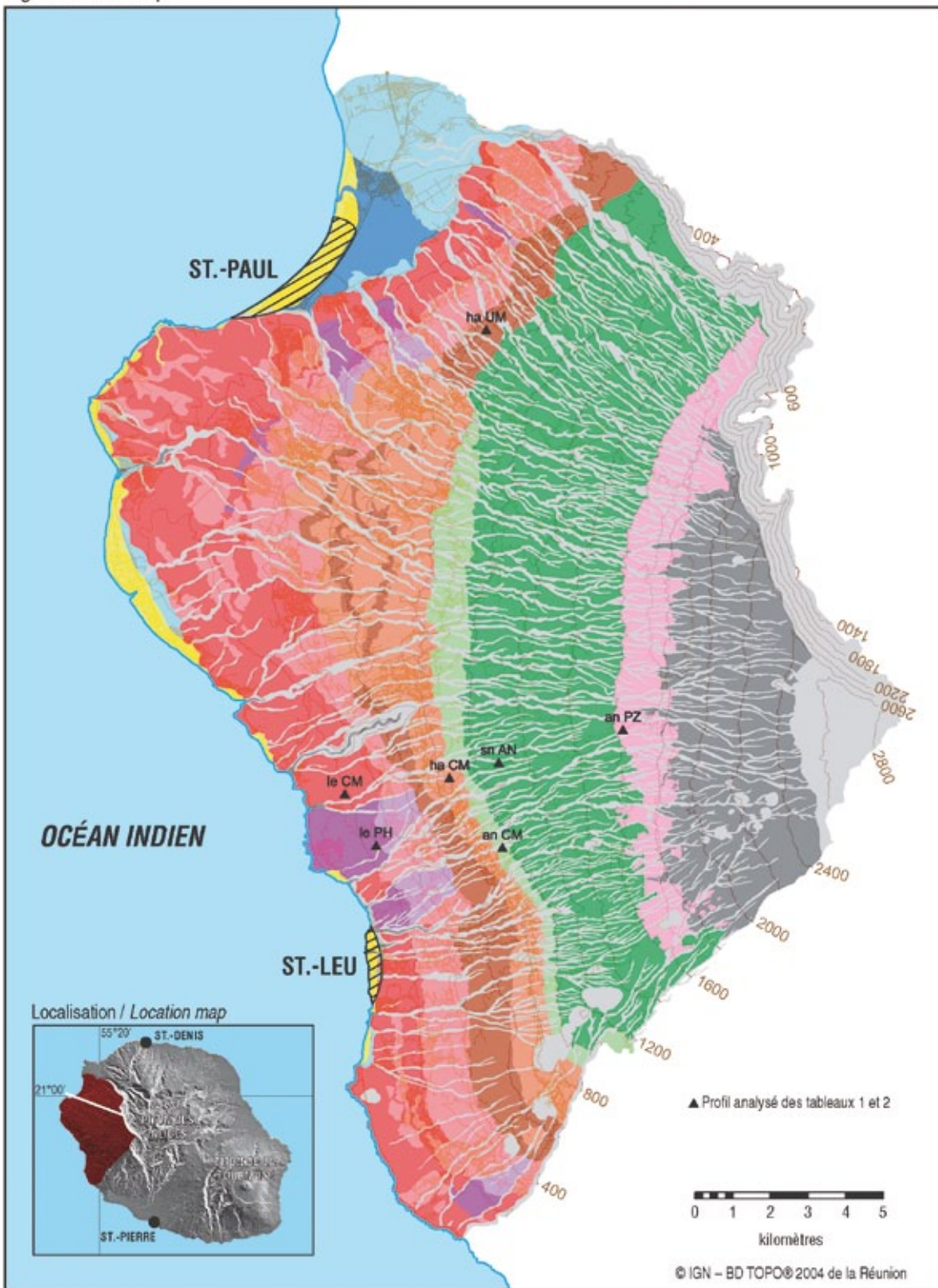
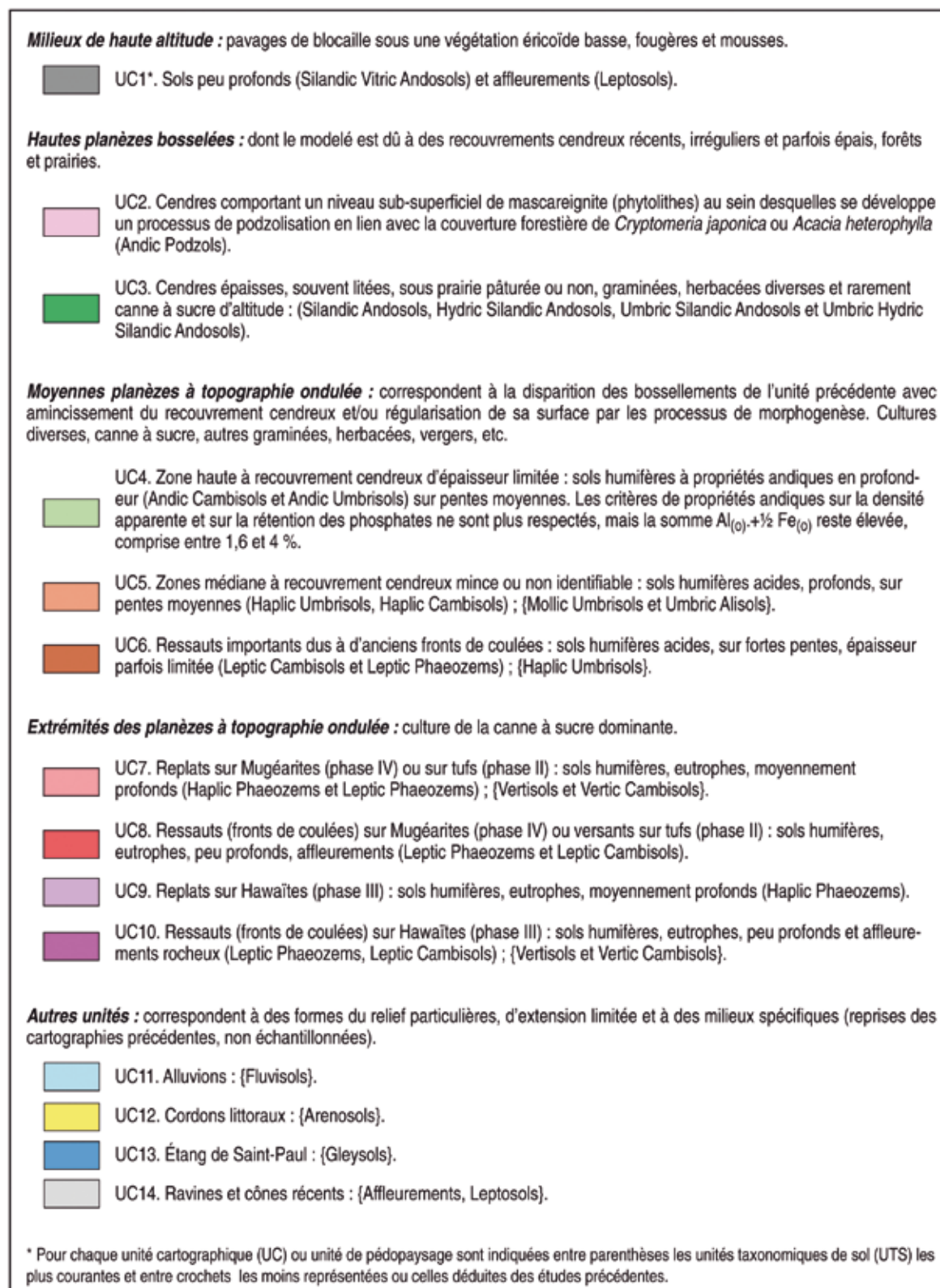




Figure 1 - Carte des sols.

Figure 1 - Soil map.



**Tableau 1** - Caractéristiques générales des profils-type des sols étudiés : andic Podzol, 1 630 m ; silandic Andosol, 1 110 m ; haplic Umbrisol, 640 m ; andic Cambisol, 1 064 m ; haplic Cambisol, 830 m ; leptic Cambisol, 131 m ; leptic Phaeozem, 262 m.

**Table 1** - General properties of selected pedons : andic Podzol, 1 630 m ; silandic Andosol, 1 110 m ; haplic Umbrisol, 640 m ; andic Cambisol, 1 064 m ; haplic Cambisol, 830 m ; leptic Cambisol, 131 m ; leptic Phaeozem, 262 m.

Profils et horizons	pH eau	pH KCl	Corg. g.kg <sup>-1</sup>	Ntot. g.kg <sup>-1</sup>	CEC cmol.kg <sup>-1</sup>	TS <sub>a</sub> %	Couleur Munsell
<b>Andic Podzol (1 630 m)</b>							
0 – 5/20 cm	4,5	3,6	144	10,8	45,2	5	7,5 YR 3/4
5/10 – 10/30 cm	4,4	3,3	67	4,0	23,8	4	2,5 YR 5/1
10/30 – 20/30 cm	4,3	3,5	141	9,9	52,3	3	5 YR 3/2
20/30 – 70 cm	4,7	4,6	103	5,3	53,5	1	10 YR 4/4
70 – 135 cm	5,1	5,3	19	1,2	26,9	1	10 YR 4/6
<b>Silandic Andosol (1 110 m)</b>							
0 – 7/15 cm	6,3	5,3	139	11,4	57,5	30	7,5 YR 3/2
7/15 – 40/50 cm	5,9	5,4	66	3,7	42,8	9	10 YR 4/4
40/50 – 130/140 cm	5,4	5,8	16	1,0	22,2	3	7,5 YR 4/4
<b>Andic Cambisol (1 064 m)</b>							
0 – 35 cm	5,1	4,5	40	4,4	36,1	24	10 YR 3/4
35 – 95 cm	5,7	5,2	11	0,9	28,6	18	7,5YR43
95 – 135 cm	5,3	4,7	8	0,6	35,7	11	10 YR 4/3
<b>Haplic Cambisol (830 m)</b>							
0 – 40 cm	5,4	4,7	31	3	28,1	19	7,5 YR 4/3
40 – 75 cm	6,0	5,0	29	3,3	25	34	7,5 YR 4/4
75 – 215 cm	6,0	5,6	12	1,1	24	19	7,5 YR 4/4
<b>Haplic Umbrisol (640 m)</b>							
0 – 30 cm	5,2	4,8	31	3,1	26,0	29	10 YR 3/2
30 – 80 cm	5,3	4,8	25	2,7	25,8	28	7,5 YR 3/2
80 – 150 cm	5,7	6,7	6	0,6	24,2	31	10 YR 3/3
<b>Leptic Phaeozem (262 m)</b>							
0 – 50 cm	6,9	6,0	25	2,4	22,7	85	7,5 YR 3/2
<b>Leptic Cambisol (131 m)</b>							
0 – 15 cm	6,6	5,3	20	1,6	26,1	85	5 YR 3/4
15 – 40 cm	7,2	5,8	4	0,4	36,3	76	2,5 YR 3/4
40 – 85 cm	7,1	5,6	2	0,2	36,5	75	2,5 YR 3/6

a : taux de saturation en bases.

**Tableau 2** - Propriétés andiques et quantités de Fe, Al et Si extraites par les réactifs oxalate d'ammonium à pH 3 (o) et citrate-bicarbonate-dithionite (d).

**Table 2** - Andic properties and Fe, Al and Si contents extracted by ammonium oxalate at pH 3 (o) and Dithionite-citrate-bicarbonate (d).

Profils et horizons	da <sub>a</sub> g.cm <sup>-3</sup>	P ret. <sub>b</sub> %	oxalfe %	pH NaF	Si(o) g.kg <sup>-1</sup>	Fe(d) g.kg <sup>-1</sup>	Al(d) g.kg <sup>-1</sup>	Si(d) g.kg <sup>-1</sup>
<b>Andic Podzol (1 630 m)</b>								
0 – 5/20 cm	n.d.	65	2,4	7,7	3	34	9	6
5/10 – 10/30 cm	0,39	30	0,5	7,4	1	12	2	10
10/30 – 20/30 cm	n.d.	77	3,0	7,8	2	52	10	6
20/30 – 70 cm	0,44	95	9,3	10,9	24	71	56	9
70 – 135 cm	0,85	94	7,8	10,4	25	112	55	19
<b>Silandic Andosol (1110 m)</b>								
0 – 7/15 cm	0,58	96	8,1	10,7	16	85	45	5
7/15 – 40/50 cm	0,75	94	9,0	10,8	21	107	57	9
40/50 – 130/140 cm	0,77	94	7,1	10,5	25	124	56	18
<b>Andic Cambisol (1064 m)</b>								
0 – 35 cm	1,09	84	2,8	9,2	5	76	24	7
35 – 95 cm	0,70	90	2,0	8,2	3	91	19	5
95 – 135 cm	0,72	97	2,5	9,1	7	99	29	11
<b>Haplic Cambisol (830 m)</b>								
0 – 40 cm	1,06	80	3,5	9,7	7	94	34	9
40 – 75 cm	0,80	77	2,9	9,2	5	93	28	7
75 – 215 cm	0,78	93	3,8	10,0	10	106	41	12
<b>Haplic Umbrisol (640 m)</b>								
0 – 30 cm	1,18	67	1,0	8,5	1	75	16	3
30 – 80 cm	1,10	80	1,2	8,6	1	81	17	3
80 – 150 cm	1,00	87	1,1	9,2	2	83	16	3
<b>Leptic Phaeozem (262 m)</b>								
0 – 50 cm	1,30	42	0,7	8,2	2	61	5	5
<b>Leptic Cambisol (131 m)</b>								
0 – 15 cm	1,27	31	0,5	8,1	1	59	4	5
15 – 40 cm	1,32	50	0,7	9,1	2	65	4	6
40 – 85 cm	1,42	47	0,7	8,9	2	51	4	9

a : Densité apparente ; b : Rétention des phosphates (méthode Blakemore) ; indice oxalfe = Al(o) + 1/2 Fe(o) ; n.d. non déterminé.

estimons qu'il faudrait ajouter à ce premier groupe de trente types de sols une dizaine de types de sols supplémentaires, pour couvrir les zones dans lesquelles nous n'avons pas décrit et analysé de profils de référence. Signalons encore que nous avons conservé la syntaxe anglo-saxonne (les préfixes précèdent le RSG et lorsqu'ils sont deux ou plus, leur ordre d'importance diminue en s'éloignant du nom du RSG) et les terminaisons en « ic » de la version anglaise de la WRB; une version française est en cours de réalisation et nous voulions éviter tout risque de confusion qu'aurait pu créer une traduction libre.

Les *tableaux 1 et 2* présentent les principales caractéristiques physico-chimiques de profils-type pour plusieurs grands types de sols étudiés. Dans le *tableau 2* ont été regroupées les caractéristiques qui permettent de diagnostiquer les propriétés andiques. Diagnostic nécessaire pour les seuls besoins de la cartographie, mais de plus fondamental en regard du but appliqué qui justifiait notre étude. Dans ces deux tableaux, les profils sont présentés selon les altitudes décroissantes.

Pour des raisons déjà évoquées, nous n'avons pas retenu le pourcentage d'argile présent dans les différents horizons dans le *tableau 1*. En effet, des valeurs fiables ne sont disponibles que pour la partie basse du versant (entre 0 et 500 m); ceci ne permet pas non plus de ramener la CEC au taux d'argile, critère important pour distinguer les sols dont les argiles ont une forte activité (HAC) des autres (LAC). Toutefois, les valeurs de la CEC par kg de terre fine étant toujours élevées, il ne fait aucun doute que nous serions en présence de sols à argiles à forte activité si la question se posait.

Dans le *tableau 2*, nous avons noté avec (o) les quantités, en  $\text{g.kg}^{-1}$  de terre fine, de Fe, Al et Si extraites par l'oxalate d'ammonium à pH 3, avec (d) celles extraites par le citrate-bicarbonate-dithionite, et « oxalfe » (Van Wambeke, 1991) la quantité  $\text{Al(o)} + 1/2 \text{Fe(o)}$ . Ces valeurs permettent aussi de calculer la quantité d'alophaane (Allo) présente dans les différents horizons selon plusieurs formules, l'une des plus simples,  $\text{Allo} = 7,1 * \text{Si(o)}$ , ayant été proposée par Parfitt et Wilson (1985). Des quantités importantes de produits amorphes (pouvant interférer avec le bon déroulement d'une analyse granulométrique) sont présentes dans les cinq profils situés dans les parties hautes et moyennes du versant. Nous avons fait figurer les valeurs du  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  dans le *tableau 2* car ce critère a été utilisé comme indicateur d'andosolisation par nos prédécesseurs. Il est ainsi aisé de voir que sur la base de ce critère, l'haplic Cambisol retenu à 830 m semble plus « andique » que l'andic Cambisol situé à 1064 m, ce que dément la prise en considération des propriétés andiques.

## DISCUSSION

Pour faire une nouvelle cartographie, le choix d'un système de classification moderne et international, celui de la WRB, s'est imposé à nous. Il bénéficie de mises au point fréquentes puisque, depuis l'étude de notre première toposéquence en 2005 (Feder *et al.*, 2006), il a été refondu en 2006, puis révisé en 2007. C'est à la fois un gage de la vitalité que permet le travail d'une communauté scientifique importante, mais aussi une source de tracas pour l'utilisateur. Ce référentiel s'est néanmoins globalement révélé bien adapté à nos objectifs; nous espérons aussi qu'il garantit la reproductibilité et une certaine pérennité de nos interprétations.

Dans le détail, si nous comparons à l'aide du *tableau 3* les différentes études recensées sur la zone de notre projet avec la nôtre au niveau de la séquence de Zebrowski, seul endroit où la comparaison est réalisable, nous constatons qu'il n'existe aucune correspondance bi-univoque entre deux de ces études. Ceci condamne tout espoir de réactualisation d'une ancienne carte à peu de frais, c'est-à-dire en gardant le contour des unités tout en adaptant le contenu. L'ancienneté n'apparaît pas comme le facteur déterminant la difficulté potentielle d'une réactualisation car l'étude la plus récente avant la nôtre (Raunet, 1988) avec ses Andosols qui descendent jusqu'à 700 m et ses sols bruns andiques entre 500 et 700 m, n'apparaît pas plus facile à réactualiser que la plus ancienne (Riquier, 1960). Entre les deux, celle de Zebrowski (1975), plus satisfaisante à certains égards (bonne limite des Andosols et identification correcte des Podzols), ne concerne qu'une toposéquence et ne commence qu'au-dessus de 350 m.

Cette comparaison fait cependant aussi ressortir des constantes. Si l'on veut bien admettre que les sols ferrallitiques beiges de Riquier (1960a) sont en fait des Andosols non identifiés comme tels pour des raisons historiques, la succession Podzols – Andosols – autres sols est reconnue de tous. Autre constante, aucun des auteurs n'a identifié de sols brun-rouille à halloysite comme signalés dans de nombreuses autres études de sols tropicaux développés sur matériau volcanique (Colmet-Daage *et al.*, 1967, 1970, 1973; Albrecht *et al.*, 1992) ou simplement des sols bruns dont la fraction argileuse serait dominée par l'halloysite comme en Équateur (Winckell *et al.*, 1991; Quantin et Zebrowski, 1997). Ceci est peut être simplement dû à la rareté des déterminations minéralogiques à l'île de la Réunion, seules des études complémentaires permettront de préciser la cause de cette différence. Elle est certainement à rapprocher du fait que nous n'ayons identifié aucun Nitisol en raison de l'absence de faces luisantes et d'un ratio limon sur argile trop élevé.

Certains lecteurs pourront s'étonner qu'il ne soit pas fait mention des différentes versions du Référentiel Pédologique (successeur de la classification CPCs), il y a à cela plusieurs

**Tableau 3** - Comparaison synthétique des études pédologiques réalisées sur la zone d'étude. Préfixes utilisés : vi (vitric), an (andic), sn (silandic), ha (haplic), le (leptic). Groupe de sols de référence utilisés : AN (Andosols), PZ (Podzols), UM (Umbrisols), CM (Cambisols), PH (Phaeozems).

**Table 3** - Synthetic comparison of the pedological studies realized on the study area. Used prefix : vi (vitric), an (andic), sn (silandic), ha (haplic), le (leptic). Used Reference Soil Group : AN (Andosols), PZ (Podzols), UM (Umbrisols), CM (Cambisols), PH (Phaeozems).

Altitude (m)	Riquier (1960)	Zebrowski (1975)	Raunet (1988)	Cette étude (2009)
1850 et +	Sols ferrallitiques beiges organiques et sols à mascareignite, lithosols organiques	Podzols	Affleurements et Andosols vitriques	vi AN
1800 - 1850			Andosols désaturés à mascareignite	an PZ
1750 - 1800				
1700 - 1750				
1650 - 1700				
1600 - 1650				
1550 - 1600	Sols ferrallitiques beiges	Andosols	Andosols désaturés perhydratés	sn AN
1500 - 1550				
1450 - 1500				
1400 - 1450				
1350 - 1400				
1300 - 1350				
1250 - 1300				
1200 - 1250				
1150 - 1200			Andosols désaturés	sn AN, an UM et an CM
1100 - 1150				
1050 - 1100				
1000 - 1050				
950 - 1000				
900 - 950				
850 - 900			Sols ferrallitiques bruns et sols ferrallitiques brun-rouges	Sols ferrallitiques andiques
800 - 850				
750 - 800				
700 - 750	Sols ferrallitiques			
650 - 700				
600 - 650				
550 - 600				
500 - 550	Sols bruns et affleurements	ha PH et le CM		
450 - 500				
400 - 450	Lithosols	(pas de données)	Sols bruns ferruginisés	le PH et le CM
350 - 400				
300 - 350				
250 - 300				
200 - 250				
150 - 200				
100 - 150				
50 - 100	Sols vertiques et affleurements			
0 - 50				

raisons. En 1988, lorsque Raunet a publié sa carte de synthèse, le Référentiel Pédologique n'existait pas puisque sa première version date de 1992. En 2008, lorsque nous avons finalisé notre propre cartographie pour en remettre les conclusions à son commanditaire, la version 1995 était disponible mais nous ne l'avons pas utilisée parce qu'elle était incomplète pour les sols tropicaux; nous étions en effet censés retrouver des sols ferrallitiques au nord de notre secteur d'étude, sols que nous n'aurions en principe pas pu classer à l'aide de ce référentiel. La cartographie réalisée nous a montré, *a posteriori*, qu'il s'agissait d'Andosols et de Phaeozems.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de la réalisation de cette nouvelle cartographie des sols sur le versant ouest du piton des Neiges, nous avons également évalué les propriétés de rétention des nitrates par les sols des différentes unités cartographiques. Ces données de capacité de rétention ont ensuite été couplées à des mesures hydrodynamiques pour construire la carte thématique de la vulnérabilité de la nappe phréatique aux pollutions transitant par le sol (Feder *et al.*, 2008), objectif initial de notre étude.

Devant le problème cartographique qui nous était posé, l'inventaire critique des données existantes nous a conduits à refaire une cartographie des sols. À l'issue de cette cartographie, nous avons montré qu'il existait une assez bonne correspondance entre nos propres interprétations et celles de Zebrowski (1975) à l'exception notable de ce qui concerne l'existence et de la place de sols ferrallitiques. Malheureusement, Zebrowski (1975) n'avait travaillé que sur une unique toposéquence et n'avait pas produit de carte et les cartes postérieures de Raunet (1988, 1989 et 1991a) n'ont pas repris ses résultats. Si nous nous plaçons maintenant dans la perspective de la réalisation du référentiel pédologique régional de l'île de la Réunion, nous pouvons souligner :

- que, par rapport aux autres DOM insulaires français, le cas réunionnais avait ceci de particulier qu'à l'exception de l'étude de Zebrowski (1975), l'île n'avait bénéficié d'aucune étude approfondie de ses sols abordant toutes les facettes classiques d'une étude de pédogenèse, notamment en ce qui concerne la minéralogie. Ce déficit n'est d'ailleurs pas comblé par notre étude appliquée;
- qu'à l'issue de notre étude, nous sommes conscients que ce que nous avons établi pour le versant sec « sous le vent » du vieux volcan de l'île ne permet guère de préjuger ce que l'on trouvera sur le versant humide du même volcan, pas plus que sur le volcan actif. Nous n'avons en particulier aucune idée de ce qu'il adviendra des sols ferrallitiques maintenus par Raunet (1988) dans certaines zones humides de l'île;

- que le problème de réalisation d'analyses granulométriques correctes, nécessaires à l'identification d'horizons argiques, se posera encore comme il s'est posé à nous pour appliquer la WRB à des non-Andosols contenant des matériaux amorphes.

Enfin, pour réaliser le référentiel pédologique régional de l'île de la Réunion, il faudra prolonger la prospection. Ne pas refaire de prospection sérieusement et se contenter de la transformation des anciennes cartes, ce serait s'exposer au risque de diffuser des informations hautement fantaisistes. Pour d'autres régions tropicales, volcaniques ou non, une partie des problèmes vus ici peut se poser; il n'y a pas de solution – type tableau de correspondance entre systèmes classification – qui permet de les résoudre. La mise en œuvre du Référentiel Pédologique, édition 2008, qui couvre maintenant tous les types du sol pourra être envisagée. Sur le secteur que nous avons étudié, son application ne rencontrera vraisemblablement aucun problème. Au nord et à l'est du piton des Neiges, pour les sols considérés comme ferrallitiques par Raunet (1988) se posera la question de savoir s'il s'agit de Ferrallitols ou de sols à pédogenèse moins aboutie. Comme ce référentiel n'impose pas une véritable hiérarchie dans les critères retenus, que la minéralogie est toujours déduite des valeurs du rapport Ki (alors que l'analyse triacide n'est plus pratiquée par les principaux laboratoires) et que le caractère transitoire des éléments amorphes n'est évoqué qu'au niveau de la caractérisation du processus d'altération, sans qu'aucun critère basé sur leur quantification ne soit proposé, on ne peut pas exclure que cela pose des problèmes du même ordre que ceux rencontrés par Zebrowski en 1975. L'extension de la cartographie à toute l'île sera une bonne occasion de tester ce référentiel en milieu tropical et volcanique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient pour leurs contributions Romain Olivier et Jean-Guillaume Robin qui ont réalisé une grande partie des observations de terrain; Didier Baret, Olivier Salmacis, Aurélien Velle et l'équipe technique de l'unité de recherche « systèmes de culture annuels » du Cirad à Saint-Denis pour l'aide apportée lors des travaux de terrain; l'équipe de l'unité de service « analyse des eaux, sols et végétaux » du Cirad à Montpellier pour le soin et la patience dont ils ont fait preuve lors de la réalisation des analyses de sols; Jean-Claude Lorente (UMR Tetis) pour l'aide apportée à la réalisation de la figure. Enfin, leurs remerciements s'adressent aussi à un relecteur anonyme qui, par ses critiques, leur a permis de préciser de nombreux points de leur manuscrit. Cette étude a bénéficié de financements du ministère de l'Outre-Mer, de la Diren de l'île de la Réunion et du fonds européen d'orientation et de garantie agricole (FEOGA).

## BIBLIOGRAPHIE

- Alarcon C., 1995 - Cycle biogéochimique du silicium en environnement tropical : application à l'étude des sols à mascaraignite de l'île de la Réunion. Thèse de l'université d'Aix-Marseille III.
- Albrecht A, Brossard M., Chotte J.-L. et Feller C., 1992 - Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 27 (1), p. 23-36.
- Aubert G. et Ségalen P., 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 4 (4), p. 97-112.
- Aubert G., 1966 - Observations sur la classification des sols ferrallitiques. Cahiers ORSTOM. Série pédologie, 4 (4), p. 89-90.
- Batjes N.H., 2000 - Methodological framework for assessment and mapping of the vulnerability of soils to diffuse pollution at a continental level (SOVEUR project). Report 97/07, FAO and ISRIC, Rome.
- Bertrand R., 1972 - Environnement et morphologie d'un Andosol à horizon d'accumulation induré. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Série D : sciences naturelles (275), p. 1343-1346.
- Blanchart E., Roose E., Khamsouk B., Dorel M., Laurent J.Y., Larré-Larrouy C., Rangon L., Pinot J.-P. et Louri J., 2004 - Pertes en carbone par érosion et drainage et variations de stocks de carbone en deux ans sous différentes pratiques en culture bananière (Martinique). In : 1, érosion du carbone, actes du colloque international « gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone », Roose E., De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (eds) Montpellier, 23-28 septembre 2002. IRD, bulletin du réseau érosion, 22, p. 95-107.
- Bussière P., 1957 - Carte géologique. Île de la Réunion au 1 : 100 000. Tirage provisoire. Service géologique de Madagascar et service de la carte géologique de France.
- Bussière P., 1958 - Étude géologique de l'île de la Réunion. Travaux du bureau géologique, 84, service géologique, Tananarive, 64 p.
- Claisse G., 1968 - Étude expérimentale de l'analyse aux trois acides : comportement du quartz pur à l'attaque triacide. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 6(2), p. 129-149.
- Colmet-Daage F., Cucalon F., Delaune M., Gautheyrou J., Gautheyrou M. et Moreau B., 1967 - Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques : première partie. Essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 5 (1), p. 3-38.
- Colmet-Daage F., de Kimpe C., Delaune M., Gautheyrou J., Gautheyrou M., Sieffermann G. et Fusil G., 1970 - Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte pacifique du Nicaragua. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 8 (2), p. 113-172.
- Colmet-Daage F., Gautheyrou J., Gautheyrou M. et de Kimpe C., 1973 - Étude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique latine à l'aide de techniques de dissolution différentielle. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 11 (2), p. 97-120.
- CPCS, 1967 - Classification des sols. École nationale supérieure agronomique, Grignon, France, 87 p.
- Feder F., Olivier R., Alary K. et Bourgeon G., 2006 - Characterization of a soil catena on the western slope of the Piton des Neiges volcano (la Réunion), Proceedings of the 18th world Congress of Soil Science, July p. 9-15, Philadelphia, USA.
- Feder F. et Findeling A., 2007 - Retention and leaching of nitrate and chloride in an andic soil after pig manure amendment. European Journal of Soil Science, 58, p. 393-404. doi : 10.1111/j.1365-2389.2006.00885.x
- Feder F., Robin J.-G. et Bourgeon G., 2008 - Cartography of groundwater vulnerability to pollutants transfer in Western part of La Reunion Island. In : IWRA, 13<sup>e</sup> congrès mondial de l'eau, Montpellier, 1-4 septembre 2008. 1 p.
- Gogu R.C. et Dassargues A., 2000 - Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, 39 (6), p. 549-559.
- IUSS Working Group WRB, 2007 - World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports N°. 103. FAO, Rome.
- Koller R., Sauter J., Pierrillas S. et Viot M., 2004 - Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires. Étude et Gestion des Sols, 11(3), p. 219-234.
- McDougall I., 1971 - The geochronology and evolution of the young volcanic island of Réunion, Indian Ocean. Geochimica et Cosmochimica Acta, 35(3), p. 261-288.
- Mendoza J.M. et Barmen G., 2006 - Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. Environ. Geol., 50, p. 569-580.
- Parfitt R.L. et Wilson A.D., 1985 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In : Caldas E.F. et Yaalon D.H. (eds.), Volcanic soils, weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt. Catena supplement 7, p. 1-8.
- Payet N., 2005 - Impact des apports de lisier sur un sol cultivé de la Réunion : étude expérimentale et modélisation des flux d'eau et de nitrate dans la zone non saturée. Thèse de doctorat de l'université de la Réunion, 236 p.
- Pédro G., 1966 - Intérêt géochimique et signification minéralogique du paramètre moléculaire  $K_i = SiO_2/Al_2O_3$  dans l'étude des latérites et bauxites. Bulletin du groupe français des argiles, 18(13), p. 19-31.
- Quantin P. et Zebrowski C. 1997 - Caractérisation et formation de la cangahua en Equateur : analyse préliminaire (chimie, minéralogie, pétrographie) de quelques types de cangahua p. 29-47 . In: Zebrowski Claude (ed.), Quantin Paul (ed.), Trujillo G. (ed.), Villamar M.D. (collab.). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcanicos endurecidos (Quito, diciembre de 1996).
- Raunet M., 1988 - Département de la Réunion. Carte morpho-pédologique au 1:50 000 en quatre feuilles. Cirad-Irat et région Réunion.
- Raunet M., 1989 - Littoral ouest – Rivière des Galets à ravine du Cap. Carte morpho-pédologique. Aptitudes à l'irrigation au 1:10 000 en cinq feuilles. Cirad-Irat et conseil général de la Réunion.
- Raunet M., 1991a - Périmètres du bras de Cilaos et du bras de la Plaine. Carte morpho-pédologique. Aptitudes à l'irrigation au 1:10 000 en six feuilles. Cirad-Irat et conseil général de la Réunion.
- Raunet M., 1991b - Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Cirad, 438 p.
- Riquier J., 1960a - Carte pédologique de reconnaissance des grands groupes de sols de la Réunion au 1 : 100 000. Communauté – Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer - Institut de recherche scientifique de Madagascar, Tananarive.
- Riquier J., 1960b - Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance. Île de la Réunion. Publications de l'institut de recherche scientifique de Madagascar, Tananarive-Tsimbazaza, 72 p.
- Soil Survey Staff, 2004 - Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey investigations reports, N° 42, version 4.0, USDA-NRCS.
- USDA, 1960 - Soil Classification, a comprehensive system, 7th Approximation, Soil Conservation Service, USDA, 265 p.
- Van Wambeke A., 1991 - Soils of the Tropics. Properties and Appraisal. McGraw-Hill, New York, 343 p.
- Winckell A., Zebrowski C. et Delaune M., 1991 - Évolution du modelé quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Équateur : 2. Quelques aspects de l'histoire paléogéographique quaternaire. Géodynamique, 6(2), p. 119-139.
- Zebrowski C., 1975 - Étude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 13(3-4), p. 255-278.

