



LE SIRS-SOLS DE LA MARTINIQUE

Erik BRAUDEAU 30/12/2007



Cliché A-L. Transler

Projet IRD/PRAM, subventionné par le Ministère de l'Outre Mer (Rapport Final)

Résumé - Un SIRS-Sols (Système d'Information à Référence Spatiale des Sols) a été créé pour le laboratoire de Pédologie au PRAM (Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique) avec pour objectif de fournir une information pédologique fiable et pertinente pour les activités agronomiques et environnementales du PRAM. Il a été élaboré selon une méthodologie reposant sur deux concepts nouveaux explicités dans ce rapport: i) l'application de l'Approche Systémique à la Pédologie et ii) la caractérisation hydrostructurale des sols. Cette méthodologie donne au laboratoire les outils qui manquaient jusqu'à présent pour recueillir et conserver les informations naturalistes des pédologues et fournir le support d'informations nécessaire à la prise en compte pluridisciplinaire du sol dans les modèles, expérimentations et recherches agronomiques et environnementales du PRAM.

SIRS-Sols de la Martinique

Rapport Final du projet (IRD/PRAM 2005-2006)

Erik Braudeau (IRD, UR SeqBio)

30/12/2007

Résumé - Un SIRS-Sols (Système d'Information à Référence Spatiale des Sols) a été créé pour le laboratoire de Pédologie au PRAM (Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique) avec pour objectif de fournir une information pédologique fiable et pertinente pour les activités agronomiques et environnementales du PRAM. Il a été élaboré selon une méthodologie reposant sur deux concepts nouveaux explicités dans ce rapport: i) l'application de l'Approche Systémique à la Pédologie et ii) la caractérisation hydrostructurale des sols. Cette méthodologie donne au laboratoire les outils qui manquaient jusqu'à présent pour recueillir et conserver les informations naturalistes des pédologues et fournir le support d'informations nécessaire à la prise en compte pluridisciplinaire du sol dans les modèles, expérimentations et recherches agronomiques et environnementales du PRAM.

Projet sur 2 ans subventionné par le Ministère de l'Outre Mer par convention signée avec l'IRD (Département Ressources Vivantes) le 23 Juillet 2004.

TABLES DES MATIERES

I. INTRODUCTION	2
1.1 Contexte Martiniquais	2
1.2 Problématique scientifique	4
1.3 Objectif général du projet	5
1.4 Acteurs, partenariat.....	6
II. METHODOLOGIE : L'APPROCHE SYSTEMIQUE APPLIQUEE A LA PEDOLOGIE	7
2.1 Pédologie et physique du sol, deux disciplines complémentaires à réconcilier	7
2.2 Définition et caractérisation hydrostructurale des unités primaires de sol.....	9
2.3 Cartographie et délimitation des unités primaires de sol	10
III. NUMERISATION DES UNITES 1/20000^{EME} DE LA CARTE DES SOLS	16
3.1 Matériels et méthodes	16
3.2 Résultats.....	20
3.3 Conclusion Représentation cartographique	26
3.4 Bibliographie.....	26
IV. MISE EN PLACE DES OUTILS D'ELABORATION ET DE GESTION DU SIRS-SOLS REALISES PAR LE PROJET	28
4.1 Kamel ^X , modèle de simulation du fonctionnement hydrostructural d'un pédon.....	28
4.2 Chaîne de mesure des paramètres de la pédosstructure	32
4.3 La base de donnée du SIRS-Sol de Martinique	35
4.4 Organisation du laboratoire autour du SIRS-Sols.....	38
V. ETUDES ET TRAVAUX RELATIFS AU PROJET	40
5.1 Rapports et Mémoires d'étudiants stagiaires	40
5.2 Travaux d'application engagés par le laboratoire	41
VI. CONCLUSION	44
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46

ANNEXES

A. THEORIE (PUBLICATIONS)

- Modeling the Soil System: Bridging the Gap Between Pedology and Soil-Water Physics (Braudeau et Mohtar, 2007)
- Les principes de l'approche systémique appliqués à la pédologie physique et à la géobotanique pour aborder le couplage des systèmes sols et couvert végétal. (E. Braudeau et P. Joseph, 2005).
- Soil water - soil structure interactions: new concepts and their modeling (E Braudeau, R.H. Mohtar, N. El Ghezal, M. Crayol, P. Clouvel, E. Jallas, and P. Martin, 2007)

B. NUMERISATION ET ETUDE DES UNITES 1/20000 DE LA CARTE DES SOLS

- Numérisation et actualisation de données pédologiques anciennes : cas de la carte de la Martinique au 1/20000^{ème} de F. Colmet-Daage (1969).
- Étude des données de la carte des sols de la Martinique en vue de son intégration dans un SIRS-Sol.

C. NOTICES DE LABORATOIRE

- Mesure de la courbe de retrait et détermination des paramètres
- Mesure de la courbe de succion du sol au tensiomètre et détermination des paramètres
- Mesure de la courbe de conductivité hydraulique du sol et détermination des paramètres
- Notice d'utilisation de la base de données du SIRS-Sols

- Guide d'utilisation de Kamel^X

Le SIRS-Sols de la Martinique

RAPPORT FINAL

I. INTRODUCTION

1.1 Contexte Martiniquais

1.1.1 Mise en SIG des travaux pédologiques anciens

La Martinique a bénéficié de la présence continue depuis les années 60 de plusieurs équipes de pédologues qui se sont succédées jusque dans les années 90 ; aussi bien de l'ORSTOM (IRD), que du CIRAD. On doit à Colmet-Daage et son équipe la presque totalité des connaissances fondamentales acquises sur les sols de la Martinique : description très fine des organisations, analyses minéralogiques, classification, analyses physico-chimiques des profils témoins, et surtout une carte des sols très détaillée (1/20 000). Lorsque cette période d'inventaire fût terminée, vers les années 70, des cartes d'occupation des sols ont été érigées avec la même précision, mettant en relation le sol et son couvert végétal (années 72 et 80). Ces deux cartes constituent un témoin historique d'une grande valeur, de nombreuses fois demandées pour des études d'évolution ou d'impact du secteur agricole sur l'environnement. Ensemble, la carte pédologique et les cartes d'occupation des sols, ainsi que les informations y afférentes, font l'objet d'une numérisation complète et d'une mise en base de données géoréférencées dans laquelle l'information primaire aura été conservée. Ce travail a débuté avec le programme GESSOL (IRD, INRA, 2004) et s'est poursuivi jusqu'en 2007 sous la responsabilité de l'US Valpedo (IRD) dans le cadre d'un programme national du GIS-Sols (Groupe d'Intérêt Scientifique sur les Sols).

A partir des années 80, les nombreuses études des chercheurs du CIRAD, de l'IRD et de l'INRA en Guadeloupe ont surtout porté sur le comportement des sols sous culture, l'activité biologique des sols, la matière organique du sol. Le sol a donc été étudié, et encore aujourd'hui, dans le cadre d'une activité agronomique traditionnelle qui est l'amélioration des systèmes de culture (meilleure gestion de l'eau et de l'azote d'après le type de sol dans les bananeraies, travail du sol et érosion, maintien de l'humus, agriculture raisonnée...). Le CIRAD possède toujours un laboratoire d'analyse de la fertilité chimique des sols, situé maintenant au PRAM, où sont effectuées plus de 1200 analyses par an.

En résumé, il existe une grande connaissance et une grande richesse d'informations pédologiques (naturalistes) sur les sols de la Martinique provenant des 10 années d'investigation approfondie de la part de l'ORSTOM et qui sont en passe d'être présentées sous forme d'un Système d'Information Géographique sous l'égide du GIS-Sols.

Un SIG sur les sols (SIG-Sols¹) est l'outil moderne de présentation des données du milieu naturel qui remplace avantageusement la carte pédologique ancienne. Cependant, les informations offertes par la carte pédologique, bien que de très bonne qualité sont anciennes et descriptives ; les études d'ordre agronomique qui ont suivi la période d'inventaire n'ont en général pas approfondi cette connaissance sur les différents types de sol de la Martinique, ne recherchant que des corrélations statistiques avec quelques critères empiriques du type de sol et de ce fait, restant très en delà de la compréhension du fonctionnement hydrique et structural du sol et des mécanismes physico-chimiques et biologiques qui s'y rattachent (comme l'absorption - désorption des pesticides, la minéralisation du carbone, le cycle de l'azote dans le sol ...).

¹ Mot sous-lequel sera dénommée dans le texte la reproduction de la carte pédologique de la Martinique (Orstom 1968) sous forme de SIG par Valpedo (IRD) ; à différencier du SIRS-Sols défini plus avant.

Se pose alors la question suivante, importante pour le PRAM : Comment utiliser les informations pédologiques, qualitatives et intégrées, présentées sous forme de carte pédologique ou de SIG, pour la recherche ou l'application agronomique et environnementale ?

1.1.2 L'enjeu d'un retour de la pédologie dans les sciences agro-environnementales

Cette question est restée posée depuis que la pédologie, naturaliste au départ, a voulu « servir » à l'ingénierie, en particulier l'agronomie. Malheureusement, l'échec de la Pédologie à pouvoir y répondre en fournissant des informations quantitatives précises et mécanistes sur les propriétés agronomiques des différents types de sol qu'elle a elle-même définis et répertoriés selon ses propres critères, a sans doute contribué à ce que cette discipline soit abandonnée de la recherche et de l'enseignement en France depuis plus d'une quinzaine d'années. On ne sait toujours pas typifier un sol par son fonctionnement hydrique en relation avec son organisation structurale interne !

Ce que tente de démontrer ce projet SIRS-Sols de la Martinique est qu'un retour de la pédologie comme discipline traitant de l'organisation interne et externe des sols (structure et fonctionnement interne ; distribution cartographique externe) est d'une importance capitale pour que les études des systèmes agronomiques et écologiques, nécessairement pluridisciplinaires car portant sur leurs différents aspects d'organisation, évolution, fonctionnement interne et activité vis-à-vis de l'extérieur, soient coordonnées et puissent être menées à bien de manière cohérente. En effet, la pédologie est non seulement la source des connaissances et d'information sur le sol mais aussi en tant que telle, **le garant de la caractérisation et modélisation du système sol sur ses aspects fonctionnels et évolutifs** nécessaires aux disciplines connexes (agronomie, microbiologie) dont l'objet d'étude est en interaction avec le sol.

On peut citer comme exemple les trois points suivants parmi les objectifs premiers du PRAM qui nécessitent une connaissance non empirique des propriétés des types de sols et de leur répartition spatiale :

- La gestion raisonnée des systèmes agronomiques ou naturels en relation avec les propriétés hydriques et structurales des sols
- Le suivi précis et la régulation des systèmes « sol-plante ».
- L'impact de l'activité agricole sur les sols et leurs conséquences

Cette reconsidération de la pédologie, recentrée sur l'organisation interne et externe des sols, aurait pour implications d'apporter à l'agriculture et aux organismes de gestion et protection de l'environnement, les moyens méthodologiques et conceptuels de:

- Traiter de la question des polluants (pesticides en particulier) dans les sols, **et par type de sol** : absorption-désorption, seuil critique de nocivité du polluant, par type de sol ;
- Traiter de l'évolution (amélioration, dégradation) de la structure fonctionnelle du sol cultivé ;
- Traiter de la gestion de l'eau et des apports de nutriments pour la plante, en fonction des propriétés hydrostructurales du type de sol concerné ;
- Traiter du passage d'échelle : passer du processus à l'échelle de l'eau dans le sol à la propriété macroscopique externe correspondante; passer de l'expérimentation sur échantillons de sol en laboratoire à la simulation du processus dans les conditions au champ ; passer de l'échelle de la parcelle à celle de la zone (de gestion), de la région, etc.

1.2 Problématique scientifique

1.2.1 Préalable méthodologique : importance de l'approche systémique

L'Approche Systémique (AS) a été dans les années 70-90 l'Approche de description recommandée pour toute discipline scientifique confrontée à l'étude, la caractérisation et la modélisation de "son objet (système) à décrire" : l'objet de ses recherches et investigations, objet organisé, qui agit et qui évolue dans un contexte lui aussi organisé et vivant. Elle a donné lieu à une large littérature qui relate les démarches, réflexions et essais d'application de plusieurs disciplines du milieu naturel et humain, comme la géographie, l'écologie, l'agronomie, etc. Un excellent état des lieux peut être trouvé dans l'ouvrage* collectif « Sciences de la Nature, Sciences de la Société, les passeurs de frontière » du CNRS (1992) ; et particulièrement dans l'article de T. Muxart, P. Blandin et C. Friedberg de l'ouvrage² pour ce qui nous concerne, la science du sol.

Concernant l'**objet sol et son organisation interne à décrire et modéliser**, nous avons montré lors d'un projet d'élaboration d'un Système d'Information à Référence Spatiale sur les Sols irrigués de Tunisie (Braudeau et al., 2001, 2004) comment l'AS permettait de définir physiquement et quantitativement l'organisation volumique (la structure) hiérarchisée du « milieu-sol », *milieu physique naturel* dans lequel et en interaction avec lequel se produisent toutes sortes de processus biologiques et physico-chimiques comme les transferts d'eau, de sel, l'activité microbienne, etc. En fait, se placer dans le cadre de l'AS, c'est être en mesure de rechercher, définir et caractériser les niveaux fonctionnels des organisations internes et externes du milieu à l'étude, le sol ; c'est ainsi reconnaître les variables, fonctions et paramètres caractéristiques propres à chaque échelle, ainsi que les relations de passage d'un niveau fonctionnel à un autre. Cette recherche a conduit à la notion de *pédostructure*, volume représentatif de la structure du milieu-sol, dont les variables, fonctions et paramètres décrivent l'organisation interne. Les travaux qui ont suivi cette étude des sols irrigués de Tunisie ont conduit à proposer un nouveau paradigme pour la caractérisation physique du sol et la modélisation physique de ses propriétés hydro-structurales, basé sur le concept de pédostructure (Braudeau et al. 2004). Ce nouveau paradigme en physique du sol s'inscrit complètement dans l'approche systémique et de ce fait, ainsi que nous avons pu le démontrer dans ce projet, ouvre la Pédologie à l'interdisciplinarité en rendant possibles les couplages physiques des modèles des disciplines connexes avec le système organisé du sol (Braudeau et Mohtar, 2007, Annexe A.).

1.2.2 La physique du sol et la modélisation du système sol-eau

La mise en place de ce paradigme systémique (Braudeau et al. 2001, 2002) permettant la description et modélisation de l'organisation interne (pédostructure) et externe (cartographique) du sol, a conduit à la formulation physique (et non plus empirique) des équations de trois des principales courbes caractéristiques du sol : la courbe de retrait, du potentiel de l'eau, et de la dynamique du gonflement (Braudeau et al. 2004, Braudeau et Mohtar, 2004, 2006).

Ces équations physiques représentent des avancées importantes dans la compréhension des processus d'interaction entre l'eau et le sol. Elles ont permis d'envisager l'élaboration d'un modèle informatique « Sol-Structure-Eau » qui simulerait le Pédon, (volume de sol en place, représentatif de l'unité cartographique environnante) dans son organisation fonctionnelle interne et le fonctionnement hydro-structural qui en découle.

Un tel modèle serait une réponse parfaite à la question posée plus haut de l'utilisation de la carte pédologique, jouant le rôle d'interface entre les informations organisées de la carte pédologique (du SIRS-Sol), et le modélisateur (utilisateur) externe : chercheur, agronome, gestionnaire etc. L'élaboration de ce modèle a été l'un des principaux objectifs du projet.

² Hétérogénéité du temps et de l'espace : niveaux d'organisation et échelles spatio-temporelles. In *Sciences de la Nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontière*. CNRS Editions 1992. Pages 403-425.

1.2.3 Le concept de SIRS-Sols

De même, une définition précise du SIRS-Sols a pu être donnée en comparaison du SIG bien connu par ailleurs. Le SIRS-Sols est un Système d'Information à Référence Spatiale de données pédologiques, organisé selon l'organisation interne du sol (structure hiérarchisée en volumes structurés, hydro-fonctionnels et emboîtés : Pédon, horizons, mottes, agrégats d'agrégats etc.) et externe (distribution spatiale des sols). Il représente le milieu terrestre naturel organisé en sous-systèmes opérants hiérarchisés inclus les uns dans les autres, de l'unité naturelle de terrain (relief) à l'unité de sol, elle-même organisée verticalement en horizons **caractérisés par leur pédostructure et le fonctionnement hydrostructural de celle-ci** (cf. Chapitre II).

Le SIG offre, au contraire, une représentation **géographique** de la distribution spatiale des sols, c'est à dire interprétée selon une approche qui n'est généralement pas systémique et sans caractérisation du fonctionnement. Ainsi le SIG-Sols (Valpedo 2007, Annexe B.) se présente sous **la forme achevée et synthétique d'une carte des sols**, qu'il n'est pas autorisé de faire évoluer sans disposer d'une méthodologie de caractérisation et délimitation des unités de sol qui ne soit pas en désaccord avec la pensée de l'auteur de la carte. Le SIG-Sols ne fournit pas non plus les caractéristiques physiques du milieu interne au sol, nécessaires à une recherche non empirique sur les mécanismes de fonctionnement hydrique internes du sol.

Ainsi, grâce à sa conception basée sur une *physique de l'organisation du sol*, le SIRS-Sol contrairement au SIG-Sols ne peut que s'enrichir et évoluer vers une meilleure connaissance des sols, de leurs caractéristiques et délimitations, ainsi que de leur fonctionnement hydrique, biologique, agronomique etc. en relation avec les différents facteurs ou contraintes du milieu externe (climatiques).

C'est donc cette méthodologie de « caractérisation et délimitation des unités primaires de sol » pour l'élaboration progressive du SIRS-Sols qui a constitué le thème de recherche principal du projet.

1.3 Objectif général du projet

L'objectif général du projet est la mise en place d'un laboratoire de Pédologie au PRAM qui doit être basé sur la méthodologie de « caractérisation et délimitation des unités de sol » envisagée plus haut pour permettre la transformation progressive de la carte pédologique ancienne (ou le SIG-Sols de la Martinique) en SIRS-Sols. Sa tâche sera ensuite d'enrichir ce SIRS-Sols et le proposer comme base de connaissance incontournable du fonctionnement du sol dans les opérations de recherche et développement agro-environnementales du PRAM.

Le projet prévoyait aussi d'initier, toujours dans l'esprit d'une recherche méthodologique, une étude concernant deux problèmes importants pour la Martinique actuellement : 1) les processus de transport et d'accumulation des pesticides dans le sol et 2) la gestion des apports d'azote dans les cultures bananières.

La réalisation du projet a reposé sur les travaux suivants :

- 1) Numérisation des unités de sol 1/20 000^{ème} de la carte pédologique de Colmet Daage
Travaux effectués par l'Unité IRD Valpedo (E. Toulemeonde, H. Le Martret, M. Brossard)
- 2) Recherche sur la délimitation des unités primaires de sol en Martinique
Travaux de E. Braudeau (IRD), P. Joseph (UAG) et Anne-Laure Transler (DEA, UAG) avec les contributions d'Irène Marquez (Master2 Silat), Maud Cabot (Master 1, Toulouse), L. Rangan (IRD), D. Adèle (IRD),
- 3) Mise au point méthodologique et installation des méthodes de mesure des propriétés hydrostructurales des sols
Par E. Braudeau (IRD), N. El Ghezal (IRD), L. Rangan (IRD), M. Crayol (Cirad), R. Achard (Cirad) et A. Hubert (Master 2, Cirad)

- 4) *Création de la base de données du SIRS-Sols pour le laboratoire d'analyse en lien avec les unités de sol*
Par N. El Ghezal (IRD) et M. Crayol (Cirad)
- 5) *Le modèle de simulation des propriétés hydrostructurales des sols (Kamel^X)*
Par E. Braudeau, N. El Ghezal (IRD) et M. Crayol (Cirad)
- 6) *Mise au point des feuilles de calcul Excel pour l'extraction des paramètres de la pédostucture à partir des courbes mesurées*
Par E. Braudeau, N. El Ghezal (IRD) et M. Crayol (Cirad)
- 7) *Suivi et simulation sol-eau d'une parcelle agronomique sous bananeraie de Rivière Lézarde*
Par R. Achard (Cirad), A. Hubert (Cirad), M. Crayol (Cirad), E. Braudeau et L. Rangon (IRD)
- 8) *Approche méthodologique de la mesure de l'affinité du Chlordécone avec les différents types de sol*
Agnes de Charlier de Chily (IRD), A. Soler (Cirad), E. Braudeau et N. Fitte Duval (Stg))

1.4 Acteurs, partenariat

Responsable : Erik Braudeau (IRD/PRAM)

Chercheurs & Ingénieurs du PRAM engagés dans le projet : Erik Braudeau (IRD) ; Agnès Charlier de Chily (CEA-IRD) ; Raphaël Achard (Cirad); Alain Soler (Cirad)

Partenaire UAG : Philippe Joseph (MC UAG, Martinique)

Ressources : Nadim El Ghezal (VCAT, ingénieur, IRD), Marie Crayol (VCAT, Ingénieur, CIRAD), Luc Rangon (Technicien, IRD) ; Dominique Adèle (Technicien, IRD) ;

Etudiants : Anne-Laure Transler (DEA, UAG) ; François Rabier (Mastère 2, Toulon) ; Maïté Loutte (Mastère 2, Louvain) ; Irène Marquez (Mastère Silat, Montpellier) ; Bruno Bompas (BTSA2, Martinique); Samuel Adelaïde (BTSA2, Martinique) ; Maud Cabot (Master1, Toulouse); Nadine Fitte Duval (Master Purpan);

Collaborations : Université Antilles Guyane; PRAM/CIRAD ; Université Catholique de Louvain ; Purdue University (USA) ; CIRAD Montpellier ; LEGTA de Croix-Rivail

II. METHODOLOGIE : L'APPROCHE SYSTEMIQUE APPLIQUEE A LA PEDOLOGIE³

2.1 Pédologie et physique du sol, deux disciplines complémentaires à réconcilier

Dans un article à paraître prochainement (Braudeau et Mohtar, 2007)³, nous exposons les raisons conceptuelles pour lesquelles une dichotomie a toujours existé entre la Pédologie, discipline naturaliste de la description et cartographie des sols, et la physique du sol qui caractérise les propriétés physiques du sol et modélise les transports d'eau et de matières dans le sol. Cette dichotomie fait qu'il n'existe **aucun lien physique (autre qu'empirique) entre, d'un côté, la description morphologique et structurale d'un horizon de sol par le pédologue, et de l'autre, la caractérisation et modélisation des propriétés hydriques de ce même horizon par le physicien du sol.**

Les équations de fonctionnement hydrique du sol sont toutes, du fait de cette rupture, empiriques : plusieurs fonctions sont utilisées pour exprimer la même propriété ; par exemple la courbe de potentiel de l'eau avec des fonctions exponentielles, puissances, etc., mettant en relation des variables globales et des paramètres empiriques et pour la plupart sans signification physique. C'est pourquoi la seule détermination en laboratoire possible de ces paramètres est la mesure de la courbe correspondante et l'optimisation de l'ajustement de l'équation choisie avec la courbe mesurée.

Nous démontrons dans l'article que l'origine de la scission entre les deux disciplines provient d'une différence de vision entre le pédologue et l'hydraulicien du sol sur le concept de « Représentative Elementary Volume » (REV) qui a été posé comme hypothèse de travail dans les années 70. Pour le pédologue, le REV représente le pédon, Volume Élémentaire de sol Représentatif de l'unité cartographique *selon des critères morphologiques et pédogénétiques de son organisation interne* (structure, couleur, matériaux, épaisseur des horizons). Pour l'hydrophysicien du sol, le REV est au contraire une *boîte noire, sans délimitation physique reconnue ni même d'organisation du milieu interne*, lequel est supposé poreux homogène et continu. Le milieu physique se référant au REV est ainsi compris par l'hydrophysicien du sol *comme une mixture indiscernable de particules solides, d'eau et d'air*. Cette hypothèse, niant toute organisation interne du milieu sol, a dû être posée par les physiciens du sol pour avoir le droit d'appliquer les équations de transfert de la Mécanique des Milieux Poreux Continus au cas des sols non saturés.

Le problème est que toutes les variables utilisées dans les équations hydrodynamiques du sol sont définies en référence à ce volume (le REV) *qui n'a aucune réalité physique, aucune organisation interne et dont la délimitation relative à la phase solide n'existe pas*. Ce sont des variables dites *volumiques*, c'est-à-dire moyennées sur un volume, comme l'est la teneur en eau θ (volume d'eau sur volume de sol) ou la densité apparente ρ (masse volumique du sol). C'est pourquoi **les variables définies sur un REV sont des variables globales ou macroscopiques ; ce ne sont en aucun cas des variables locales internes (ou microscopiques) c'est-à-dire définies à l'échelle d'activité du processus dans le volume de sol considéré** (comme le serait par

³ Ce chapitre fait directement référence aux documents suivants mis en Annexes :

- **Modeling the Soil System: Bridging the Gap Between Pedology and Soil-Water Physics**. E. Braudeau & R.H. Mohtar, accepted in Global and Planetary Change Journal, Special issue (2007).
- **Les principes de l'approche systémique appliqués à la pédologie physique et à la géobotanique pour aborder le couplage des systèmes sols et couvert végétal**. E. Braudeau & P. Joseph (2005). Communication en séance plénière au Colloque « Les écosystèmes forestiers des Caraïbes - De la connaissance fondamentale à la gestion durable », 5-10 Décembre 2005, La Martinique.
- **Spatialisation à différentes échelles fonctionnelles des systèmes sol/végétation à la Martinique : Approche systémique**. A. L. Transler-Unfer, (2005) DEA Caraïbes, Amériques Latine et du Nord, UAG, Martinique.

exemple la teneur en eau dans le plasma argileux des agrégats primaires, en un point donné du sol).

Cela a une conséquence grave en science du sol, à savoir que les notions de structure du sol ou d'organisation du « milieu sol », **ne sont pas, mais aussi ne peuvent pas, être prises en compte** dans les équations physiques et thermodynamiques des modèles de transfert sol-eau actuels, toutes fondées sur la notion de REV (Baudeau & Mohtar, 2007, Annexe A.). Or, il est avéré que le milieu sol est un milieu physique organisé en agrégats (Brewer, 1972), dans lequel évolue la vie biologique et circulent les flux de matière (en particulier l'eau et l'air) ; et ceci à différents niveaux de structure qu'il est nécessaire de reconnaître et prendre en compte.

Pour tenir compte de cette structure hiérarchisée d'un horizon de sol en agrégats, il a été nécessaire d'établir le concept de *Volume Structural Élémentaire Représentatif* (SREV) à une échelle déterminé (motte, couche de sol d'un horizon).

Les particularités de ce volume structural représentatif (SREV) sont : 1° que sa délimitation est une délimitation physique ; une fois supposée dans la discrétisation du milieu, elle enveloppe une structure composée de la phase solide uniquement. Cette enveloppe a un caractère physique en ce sens qu'elle renferme une masse fixe des solides composant la structure, alors qu'elle est perméable aux phases liquides et gazeuses mobiles dans cette structure.

Ainsi toutes les variables définies sur un SREV sont rapportées non plus au volume (variable) du SREV mais à la masse de la phase solide structurale enfermée dans ce volume. La pédostucture est un exemple de SREV de l'horizon considéré à l'état humide. Les variables sont cette fois physiquement définies par rapport à l'organisation interne et hiérarchisée du « milieu sol ». Elles respectent et représentent la hiérarchie fonctionnelle du « milieu sol ». Ce sont bien ces variables, définies au niveau des processus, que l'on doit faire figurer dans les équations physiques décrivant les processus dans le sol; et en premier lieu, dans les équations d'interaction de l'eau et de l'air avec les particules solides hiérarchiquement organisées dans la structure du sol (Braudeau et Mohtar, 2004).

Un exemple de définition des variables d'organisation et de fonctionnement d'un horizon de sol est fourni par la Figure 1.

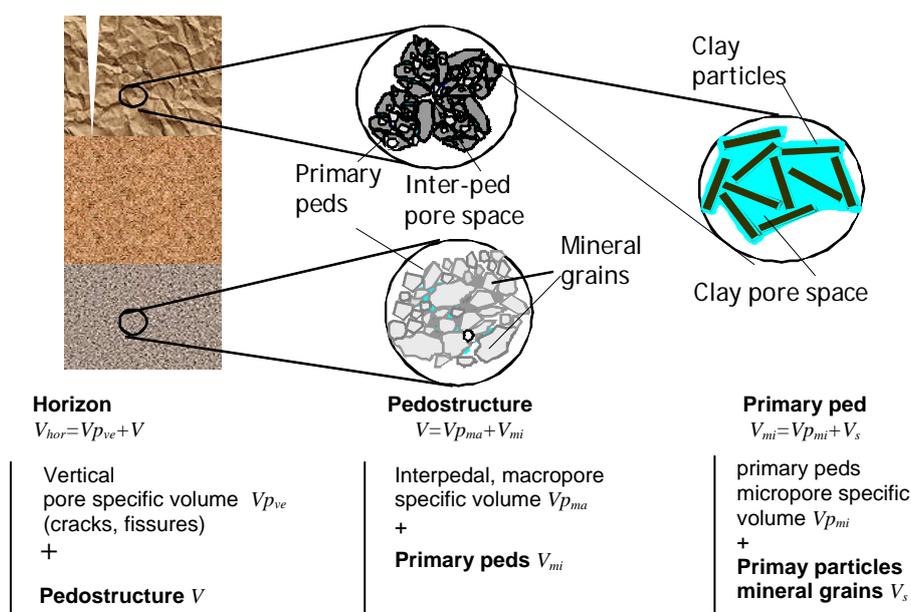


Figure 1. Représentation schématique des niveaux d'organisation fonctionnels d'un pedon : l'horizon, la pédostucture, les peds (agrégats) primaire et les particules solides.

Les variables définies sur ce schéma sont des volumes divisés par la masse de la phase solide contenue dans le SREV qui les contient, ici la pédostructure.

Ce changement de paradigme en physique du sol, qui a consisté à introduire la notion de Volume Structural Représentatif (SREV) dont la pédostructure est un exemple au niveau de l'horizon de sol, permet de mettre en relation le modèle de description morphogénétique du pédon par le pédologue avec la description fonctionnelle et dynamique du même pédon par l'hydrophysicien du sol (Braudeau & Mohtar, 2007, Annexe A.); ce que nous avons représenté à la Figure 2 dans le système de description universel à trois axes de l'approche systémique (Braudeau & Joseph, 2005).

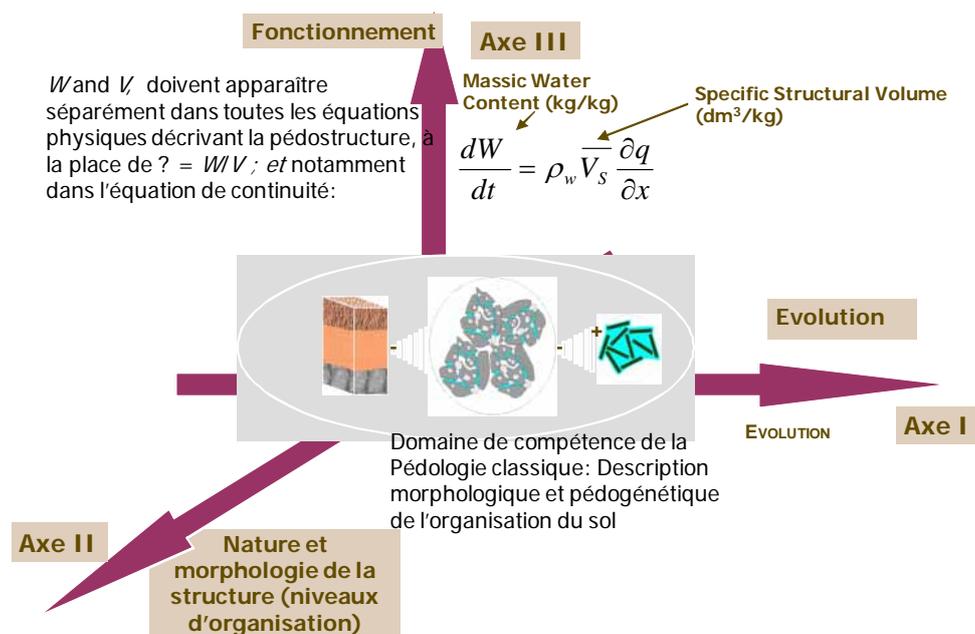


Figure 2. Axes de description du sol en science du sol (pédologie et physique du sol). W et θ sont les teneurs en eau gravimétrique et volumétrique respectivement, et V le volume spécifique.

Cette réconciliation entre les deux disciplines, pédologie et physique du sol, est à la base de la méthodologie que nous voulons mettre en place autorisant la transformation de la carte pédologique ancienne en SIRS-Sols. Elle permet en effet d'engager les 3 opérations suivantes qu'il était impossible d'envisager auparavant :

- La caractérisation hydro structurale des sols types définis et décrits en pédologie
- La modélisation hydro structurale du pédon représentatif de l'unité primaire de sol
- La délimitation d'une unité cartographique primaire de sol dont le pédon est le volume élémentaire représentatif

2.2 Définition et caractérisation hydrostructurale des unités primaires de sol

La possibilité théorique de compléter la caractérisation morphogénétique de l'unité cartographique de sol par l'aspect fonctionnel de son organisation interne, nous permet de définir l'unité « primaire » de sol comme l'extension spatiale du pédon représentatif, caractérisé par les propriétés hydrostructurales des horizons qui le composent.

On démontre en effet que le fonctionnement hydrostructural d'un horizon de sol est totalement caractérisé par la mesure en laboratoire des quatre courbes caractéristiques du comportement hydrique de la pédostructure, SREV d'un horizon de sol (Un cylindre de 100 cm³ de sol prélevé au

sein de l'horizon légèrement humide peut être considéré comme un représentant de la pédostructure). Ces courbes sont :

- La courbe de retrait, volume spécifique d'un échantillon de sol en fonction de la teneur en eau
- La courbe de potentiel de l'eau (ou de succion) en fonction de la teneur en eau
- La courbe de conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau
- La courbe de gonflement des agrégats immergés dans l'eau en fonction du temps

Les deux premières courbes sont des caractéristiques du fonctionnement thermodynamique du sol et les deux suivantes, de la dynamique conjointe de l'eau et de la structure du sol (Braudeau et Mohtar, 2007, Annexe A.). La forme des équations et les paramètres de ces courbes ont été physiquement établis sur la base de l'organisation interne de la pédostructure et son interaction avec l'eau aux différents niveaux d'échelle. Les paramètres de ces équations ont par conséquent une signification physique précise qui permet de les déterminer par la mesure des courbes correspondantes.

Comme nous le verrons plus loin dans le chapitre modélisation, le nombre total de paramètres indépendants de ces équations physiques des 4 courbes et donc du fonctionnement hydrostructural du sol, peut être limité à 15 de façon pour être applicable à tous les types de sol. **Avec les courbes de retrait et de potentiel de l'eau**, nous disposons de 9 paramètres caractéristiques de la pédostructure de l'horizon et représentant ses états d'équilibre thermodynamiques en fonction de la teneur en eau.

Ces deux courbes représentées par ces 9 paramètres peuvent être considérée comme suffisantes pour **définir quantitativement et discriminer un type de fonctionnement de sol** que l'on attribuera à l'unité cartographique de sol correspondante, laquelle est définie, dans la carte de Colmet Daage, d'après la morphologie des horizons, la nature du matériaux argileux et le stade pédogénétique (Figure 2).

C'est pourquoi dans le cadre du projet, pour caractériser et valider la délimitation des unités primaires de sol, il a été prévu d'installer les méthodes de mesure des 4 courbes caractéristiques mentionnées et de mettre au point les méthodes d'extraction des paramètres de ces courbes.

2.3 Cartographie et délimitation des unités primaires de sol

Nous avons montré dans notre communication au Colloque « Les écosystèmes forestiers des Caraïbes » (Braudeau & Joseph, 2005, en Annexes) comment l'approche systémique s'applique tout particulièrement à la pédologie dont la problématique est de cartographier, analyser, caractériser, modéliser le sol à ses différents niveaux d'organisation.

Cet article est une réflexion sur l'approche systémique et la théorie de la modélisation selon Le Moigne (1994) et sur ce qu'elles impliquent pour les disciplines du milieu naturel, en particulier la pédologie. Le texte suivant en est tiré.

2.3.1 Approche Systémique pour la reconnaissance des organisations internes et externes du sol

La méthodologie de reprise cartographique et de caractérisation physique du sol que nous avons mise en place à la Direction des Sols en Tunisie, pour l'établissement SIRS des sols irrigués de la Basse Vallée de la Majerda (Braudeau et al. 2001), était une application de la théorie du Système Général analysée et présentée par J.L. LeMoigne : Le modèle du Système Général ou théorie de la modélisation (Edition de 1994). Il s'agissait pour nous d'introduire la problématique de la cartographie du sol et sa caractérisation physique dans le cadre de l'approche systémique. Dans son ouvrage, J-L. LeMoigne a analysé sous tous les angles pourrait on dire, la notion de Système Général introduite par Bertalanfy, pour en ressortir une représentation, un modèle du SG.

Le Moigne nous rappelle tout d'abord que la description de toute chose se fait nécessairement selon trois axes pour être complète, c'est-à-dire pour refléter les 3 aspects fondamentaux et inséparables d'une chose de ce monde : elle est (elle a forme et substance), vit (évolue, se transforme au cours du temps) et agit (ou réagit) en relation avec l'extérieur (Fig. 3). Ces axes ont été appelés ontologique, génétique et fonctionnel respectivement ; mais d'autres noms exprimant ces trois aspects peuvent leur être attribués en fonction de l'objet qu'ils décrivent. Concernant les sols (cf. Figure 2) il sera justifié de les appeler axe organisationnel (organisation hiérarchisée de la phase solide), génétique (genèse, amélioration, dégradation, transformation des horizons de sol), et fonctionnel (propriétés physiques du sol en réponse à son environnement).

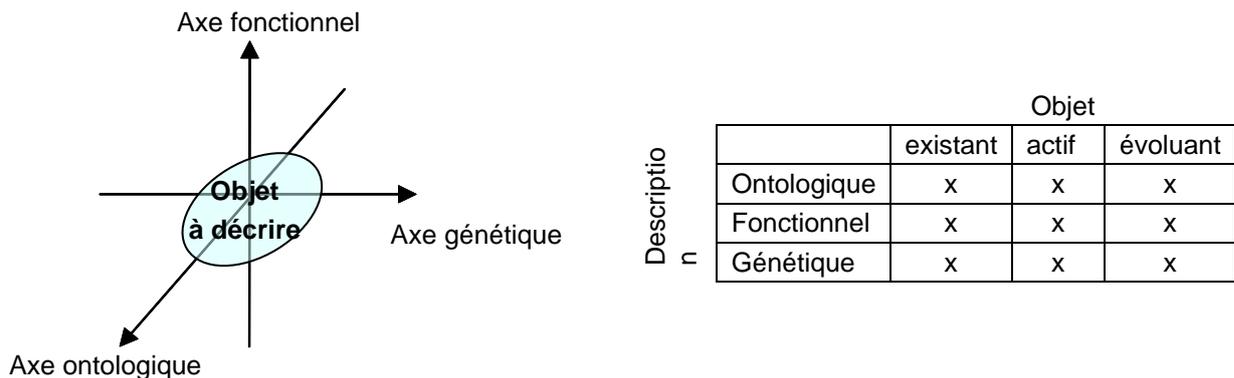


Figure 3. Référentiel général de description d'un objet organisé et tableau de l'analyse croisée effectuée par Le Moigne (1994) d'où a émergé le modèle du Système Général Figure 4.

Le Moigne élabore ensuite une représentation (ou modèle) du SG lequel est considéré comme l'objet à décrire selon les trois axes représentés à la figure 3. C'est donc d'une description matricielle croisée 3x3 entre l'objet existant selon les trois axes et l'observateur décrivant selon ces mêmes 3 axes, que Le Moigne a mis en évidence ce qu'on pourrait appeler le Modèle Général du Système le plus évolué (niveau 9) et dont la représentation est donnée à la figure 4.

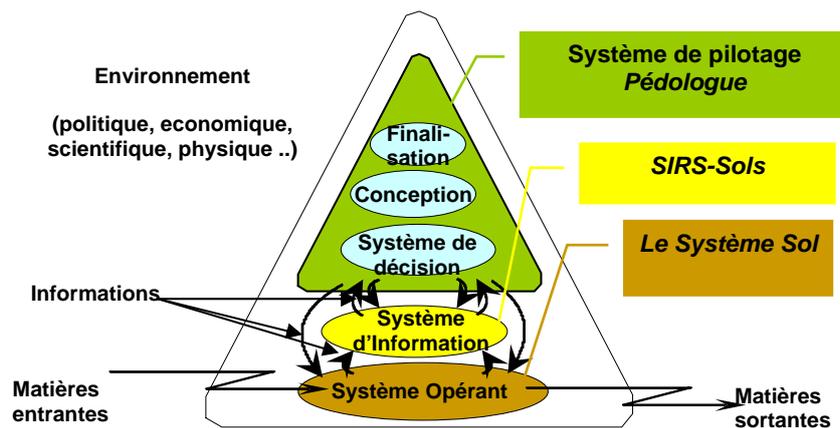


Figure 4. Le Système Général, outil de modélisation (Le Moigne, 1994)

Ce Système le plus évolué est en fait le Système Général (SG) envisagé par Bertalanfy. Il est composé de trois sous-systèmes de nature différente, le Système Opérant (SO), le Système d'Information (SI) et le Système de Pilotage (SP). Le SO est en contact avec l'environnement externe par l'intermédiaire des flux qui entrent, sortent, le traversent et interagissent ou non avec

lui. Ces flux sont contrôlés par un SP sur la base d'une information qui lui vient d'une certaine mémorisation du SO, le Système d'Information.

A ce concept de modèle de SG, nous voulons faire deux remarques essentielles :

1° Bien que Le Moigne ne l'ait pas affirmé clairement, ce modèle de SG de niveau 9 sera considéré par nous comme représentant universellement le modèle de la relation de l'homme à son objet d'étude, d'attention, de gestion ou autres. En effet Le Moigne n'a pas introduit de distinction entre système naturel et système humain. Pour lui, tout système est isomorphe du système général. Cependant, dans nos domaines des sciences de la terre ou de la nature, on sait bien qu'il existe des systèmes où l'homme n'a aucune part dans leur création. Par contre, il a manifestement une part dans leur gestion, exploitation, connaissance, etc. Ces systèmes naturels sont très logiquement des Systèmes Opérants lorsqu'ils sont intégrés dans des systèmes formés à l'image du SG où l'homme intervient comme Système de Pilotage, contrôlant, gérant, améliorant sa connaissance du SO par l'intermédiaire d'un SI (Figure 4).

Nous proposons donc d'appeler Système Humain ce système formé de l'Homme et de son objet d'étude, de gestion ou de contrôle, auquel le modèle du SG s'applique parfaitement et par opposition au Système Naturel ; celui-ci étant le Système Opérant lorsqu'il fait partie d'un Système Humain (n'importe quel système de gestion) à l'image du Système Général. Si l'on adopte cette terminologie Système Naturel = Système Opérant dans le SG, on se met en accord avec la spécificité des trois axes de description d'un système naturel : sa vie, sa structure positionnée dans l'espace et son activité liée à l'interaction physique et chimique avec le milieu externe.

Il y a par conséquent un léger changement de perspective à opérer dans la définition du SG : tout SG est un système humain dans lequel l'homme est en relation de gestion, de connaissance, d'exploitation... avec un sous-système appelé SO, qui peut être soit humain (un sous-SG), soit naturel (composé d'éléments naturels). L'organisation spatiale interne et le fonctionnement interne de ce SO sont érigés, c'est-à-dire modélisés par l'homme (Système de Pilotage), en Système d'Information, le SI, pour gérer, prévoir, contrôler au mieux la production et la durée de vie de Son Système (Fig. 4).

Comment ne pas voir que le SI est tout simplement le cousin de nos SIG actuels? C'est là que vient notre deuxième remarque.

2°) Bertalanfy comme Le Moigne parlent bien d'une hiérarchisation des systèmes opérants ("The general theory of hierarchical order obviously will be a mainstay of GST"), aussi bien que d'une systémographie qui est la reconnaissance des limites ou délimitation d'un système considéré. Cependant, en aucun cas ces auteurs ne traitent de la hiérarchisation **spatiale** des systèmes alors que c'est le problème clef de la description du milieu naturel à ses différents niveaux d'échelle emboîtés qui a été traité dans la théorie de la hiérarchie appliquée aux sciences de la nature (O'Neill *et al.*, 1986). Ceci a une importance décisive sur les limitations du modèle du SG de Le Moigne concernant les systèmes naturels. Si Le Moigne a bien considéré une hiérarchie sur l'axe génétique (les différents niveaux d'évolution d'un système), il n'a pas considéré l'axe ontologique (structure ou organisation) comme étant lui aussi *structuré dans l'espace et hiérarchisé*.

Si le système à décrire est un système naturel, les trois axes de description utilisés par Le Moigne doivent en fait être considérés comme gradués, comme ils le sont pour le système Sol (Fig. 5) que l'on prend en exemple :

- Sur l'axe génétique on doit faire apparaître les stades d'évolution qui se succèdent. A un moment donné, et donc à un stade d'évolution donné, le système est décrit relativement aux deux autres axes (structure et fonctionnement). C'est la description des propriétés structurales et fonctionnelles de l'objet aux différents stades d'évolution, qui fait la description de l'évolution de cet objet sur l'axe génétique (ou évolutif).

- Sur l'axe organisationnel ou morphologique, c'est la spatialité hiérarchisée de l'organisation interne du système qu'il faut faire apparaître. La systémographie est faite sur cet axe. Elle cherche à reconnaître et définir les niveaux d'organisation qui sont fonctionnelles (critère de délimitation), c'est-à-dire qui émergent d'eux-mêmes par leur fonctionnalité.

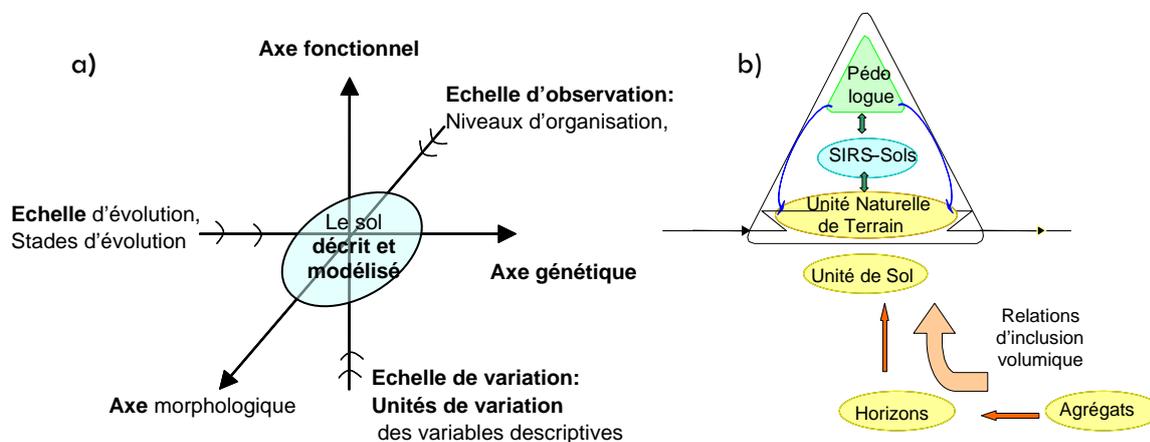


Figure 5. a) Graduation des axes du référentiel général de description pour un système naturel comme la couverture pédologique ; et b) représentation du Système Général correspondant.

- Sur l'axe fonctionnel, les variables d'organisation et de fonctionnement définies sur l'axe organisationnel ont leurs domaines de variation et leurs propres unités reportés sur cet axe.

On en déduit pour « l'objet sol » le modèle du Système Général correspondant (Figure 5b) dont le système d'information est nécessairement à référence spatiale, organisé à l'image du Système Opérant.

Remarquons que les critères de délimitation des sous-systèmes décrits sur l'axe d'organisation sont des critères de fonctionnalité décrits sur l'axe fonctionnel ; et inversement, toutes les variables de l'axe fonctionnel sont définies d'après l'organisation interne de l'objet.

Comme cela a été dit dans la remarque précédente, le Système d'Information (SI) qui est une représentation (modélisation) du Système opérant (SO), doit refléter au mieux celui-ci dans ses trois aspects décrits selon les trois axes que l'on vient de définir (Figure 5). Ces trois aspects sont donc, pour le sol, l'état d'évolution actuel (typifié par le stade d'évolution), l'organisation spatiale aux différentes échelles fonctionnelles emboîtées et les équations qui décrivent le fonctionnement des organisations du système sous l'influence des facteurs externes : la météorologie, l'exploitation agricole, l'occupation des terres, etc.

C'est pourquoi le SI, qui est une modélisation du SO selon les trois axes de description de la Figure 5a, est nécessairement à référence spatiale calquée sur l'organisation spatiale et fonctionnelle du SO. Si le SO est un sous-système humain, il s'agira d'un SIG car organisé selon une interprétation géographique du sous-système humain ; s'il s'agit d'un système naturel, ce sera plutôt un SIRS car organisé selon l'organisation spatiale du système naturel. Le nom de SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale) que l'on rencontre quelquefois à la place de SIG (Système d'Information Géographique) beaucoup plus connu, est donc très bien adapté pour désigner le système d'information du modèle de SG proposé par Le Moigne (Figure 4) pour représenter le milieu naturel et en particulier la couverture pédologique; ceci à condition d'avoir su faire la distinction entre les deux types de sous-systèmes opérants, soit humain, soit naturel. Un exemple de cette distinction est donné à la figure 6.

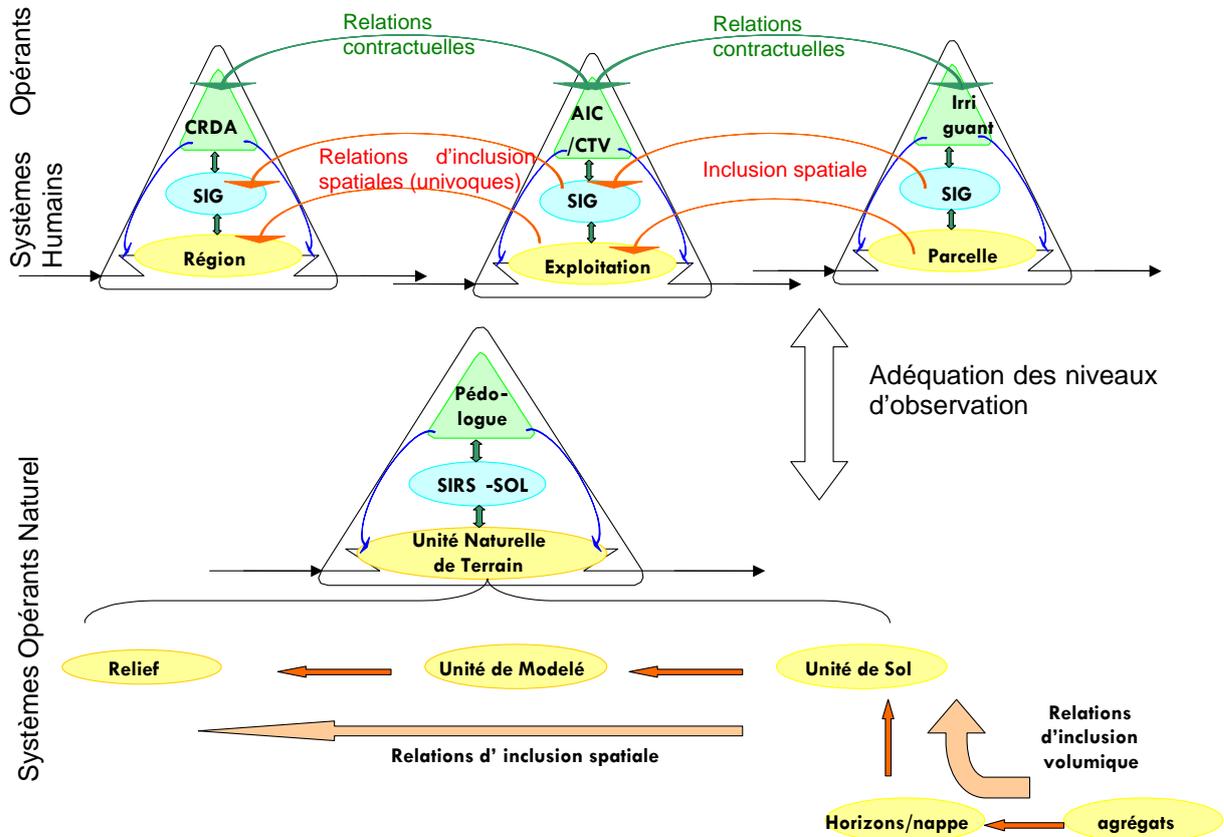


Figure 6. Distinction des Systèmes Opérants du milieu naturel et humain, donnant lieu respectivement aux SIRS et SIG.

L'adéquation entre les différents SG (disciplines scientifiques, systèmes de gestion) se fait entre les Systèmes d'information respectifs.

Cela nous amène à une compréhension plus précise de ce que peut être l'application de l'approche systémique à la Pédologie :

- 1°) La référence obligée aux trois axes de description définis ci-dessus.
- 2°) La reconnaissance du modèle du Système Général (SG) de Le Moigne (1994) comme exprimant la relation de l'homme, dans notre cas le pédologue, au système naturel structuré, organisé et fonctionnel (le Sol) qui fait l'objet de son attention.
- 3°) La reconnaissance que le Système d'Information (SI) du SG dans la représentation de Le Moigne (1994) (Figure 4) est nécessairement un SIRS, homomorphe de l'organisation spatiale du système naturel opérant, le sol.

Le SIRS est une mémoire organisée, une base de données qui, lorsqu'elle est aboutie, comprend toutes les informations spécifiques du SO et de ses sous-systèmes, leurs variables et paramètres d'organisation et de fonctionnement. Les données purement empiriques, sans définition sur l'un des

trois axes de description, sont peu à peu abandonnées au fur et à mesure de la connaissance du système.

L'approche systémique est donc le cadre conceptuel basé sur les trois points précédents, dans lequel doit s'élaborer le SIRS du système opérant naturel considéré, placé entre les mains de la discipline scientifique correspondante (Figures 4 et 5).

2.3.2 Application de l'approche systémique à la cartographie et la recherche de l'unité primaire de sol

Il s'agira d'effectuer une *systémographie* de la couverture pédologique selon l'axe organisationnel du référentiel de description représenté aux figures 2 et 5, en relation avec les 2 autres axes. Comme pour la carte des sols simplifiée au 1/100 000^{ème} de Colmet Daage (1970) donnant les grands types de sol, leur délimitation se fera relativement aux grands facteurs d'évolution responsables de la genèse et l'évolution du sol: la zone climatique, ses épisodes, le relief et sa mise en place. Relativement au schéma du système naturel représenté à la figure 6, ces délimitations sont faites au niveau des grandes unités de relief facilement observables sur photo satellite.

Ensuite on se base sur la géomorphologie pour rechercher les sous unités du système naturel. On sait que le type de matériaux (constituant de la structure) dépend de la roche mère (géologie) et beaucoup du régime hydrique qui domine dans le sol, le régime pédoclimatique. Celui-ci est fonction de la position dans la forme du relief : haut de pente, milieu ou bas de pente exemple car de cette position dépend directement l'intensité du drainage, de l'aération etc. Par conséquent *l'unité primaire de sol*, celle qui sera caractérisée par une *organisation fonctionnelle type* de son représentant le pédon, est à rechercher à l'intérieur de ces unités géomorphologiques.

Par conséquent une carte de sol érigée en SIRS, selon l'approche systémique définie plus haut, devrait présenter au moins trois niveaux de structure emboîtées : l'unité de relief, l'unité de forme, la position dans la forme et enfin l'unité primaire de sol, dont les limites sont incluses les unes dans les autres. Étant donné que les unités géomorphologiques sont facilement délimitées par les outils informatiques actuels (imagerie satellite, MNT) la délimitation de l'unité primaire de sol est facilitée par le fait que ses limites restent incluses dans l'unité géomorphologique d'ordre supérieur.

Une étude sur l'organisation des unités de sol au 1/20 000^{ème} de la carte pédologique de Colmet Daage (1969) relativement aux unités géomorphologiques dégagées par l'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT, 10m) a été l'un des travaux importants du projet pour la recherche d'une méthodologie adaptée à la vérification et rectification éventuelle des limites de ces unités 1/20000^{ème} de la carte des sols détaillée, à l'intérieur de limites géomorphologiques que l'on devait en même temps faire ressortir (Chapitre V, travaux de Irène Marquez).

III. NUMERISATION DES UNITES 1/20000^{ème} DE LA CARTE DES SOLS

Ce travail a été commandité par le projet SIRS-Sols à l'US Valpedo (IRD) qui a pu ainsi intégrer la couche des unités 1/20 000^{ème} de la carte de Colmet Daage (couche exigée par le projet car proche du concept d'*unités primaires de sol*) dans le SIG initialement prévu par le GIS Sols au 1/100 000^{ème} (échelle de définition des grands paysages). La couche aux 1/20 000^{ème} demandées a été livrée en fin d'année 2006. La majeure partie du rapport⁴ est présentée intégralement ci-dessous.

3.1 Matériels et méthodes

3.1.1 La donnée source : carte des sols de la Martinique au 1/20000^{ème} et sa légende

La carte des sols de la Martinique au 1/20000^{ème} de Colmet-Daage (1969), de par sa grande taille, a été segmentée en 24 planches de couleur, présentées en format papier (26 x 70 cm), auxquelles est associée la légende de la carte des sols des Antilles, identique pour la Martinique et la Guadeloupe (Colmet-Daage, 1969). Colmet-Daage a indiqué sur sa carte deux données principales : topographiques et pédologiques.

Les données pédologiques

Pour la Martinique, la légende détaillée de Colmet-Daage fait apparaître 14 ensembles de sols. En plus de la couleur caractéristique de l'ensemble de sol considéré, Colmet-Daage a défini une certaine hiérarchie dans l'énoncé des types de sols qu'il a décrit. Ainsi, à chaque ensemble de sol est associé un faciès de sol, puis un sous-faciès si besoin, et parfois des variantes. L'ensemble de sol peut également être divisé en sous-ensembles. Le nombre d'entités correspondant à chaque niveau hiérarchique est présenté dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : ENTITES PEDOLOGIQUES DEFINIES PAR COLMET-DAAGE

Dénomination	Ensembles de sols	Sous-ensembles	Faciès	Sous-faciès	Variantes
Alluvions continentales	A	3	6	3	15
Colluvions	B*	0	4	0	0
Alluvions marines, marécages	D	0	3	2	0
Sols bruns rouille à halloysite	H	3	4	16	5
Sols peu évolués sur cendres	J	0	5	4	5
Sols à allophanes sans gibbsite sur cendres et ponces	P	2	12	3	12
Sols à allophanes avec gibbsite sur tufs fins	T	0	11	0	6
Ferrisols compacts	G	0	9	0	0
Sols rouges ou bruns à montmorillonite	I	0	6	5	0
Intergrades ferrisols-vertisols	K	0	7	5	0
Sols vertiques et mollisols	N	0	4	0	1
Vertisols UDIC	U	0	2	0	0
Vertisols	V	0	4	3	4
Vertisols calcaires	V ^c	0	4	14	0
TOTAL	14	8	81	55	48

*B : la lettre B précède ordinairement le type de sol dont le sol colluvionné dérive.

Colmet-Daage l'assimile alors au faciès, mais il n'a pas fait la distinction dans la légende. Ceux-ci n'ont pas pu être comptabilisés

⁴ **Numérisation et actualisation de données pédologiques anciennes** : cas de la carte de la Martinique au 1/20000^{ème} de F. Colmet-Daage (1969). E. Toulemonde, H. Le Martret, M. Brossard (2006). Document de l'Unité Valpedo, IRD, Montpellier. (mis en annexe)

Colmet-Daage utilise différents critères pour définir les différents niveaux hiérarchiques. Un ensemble de sol, plus haut niveau hiérarchique, est un groupe de sols présentant soit un degré d'évolution du profil analogue, soit des traits minéralogiques communs. Le degré d'évolution du profil, lorsqu'il présente des différences dans un même ensemble, devient un critère de distinction entre deux sous-ensembles. La subdivision d'un ensemble en faciès répond à des critères de localisation géographique, de présence d'horizons-diagnostic, de profondeur et de caractères physiques (couleur, texture, compacité). Les sous-faciès sont utilisés lorsque des caractéristiques remarquables pour un certain faciès sont mis en évidence, mais dans un contexte géographique localisé. Les variantes, quant à elles, apportent des précisions supplémentaires caractérisant soit le profil, soit la roche-mère, soit la pierrosité, ou encore l'hydromorphie.

Mais analyser seulement la légende de Colmet-Daage pour comprendre la pédologie complexe de la Martinique n'est pas suffisant ; il faut également observer la carte en détail pour voir apparaître des distinctions pédologiques et cartographiques non détaillées dans la légende. En effet, à la hiérarchisation des sols précisée plus haut, s'ajoutent les sols polyphasés issus de l'altération de deux roches mères superposées, et les associations cartographiques. Pour ces dernières, il y a passage progressif d'un type de sol à l'autre dans une même unité. Cette différenciation se fait vraisemblablement suivant la topographie, et serait trop floue pour que Colmet-Daage ait pu tracer une limite entre ces deux types de sol.

Colmet-Daage a ajouté une indication supplémentaire sur les sols, non pas au niveau des attributs de chaque unité cartographique, mais à partir du code couleur. En effet, après observations analytiques, Colmet-Daage s'est aperçu que certains types de sols, bien qu'ayant des caractéristiques morphopédologiques similaires, ne présentaient pas les mêmes propriétés chimiques et minéralogiques, et tendaient de ce fait plus vers un autre type de sol. Cette différenciation, il l'a fait apparaître au niveau de la carte par le code couleur. Chaque ensemble de sol a sa couleur propre, et si un sol d'un ensemble a des caractéristiques chimiques et minéralogiques du sol d'un autre ensemble, Colmet-Daage lui a affecté d'une part les attributs sémantiques du premier ensemble et d'autre part la couleur du deuxième ensemble. Ceci est surtout vrai pour les intergrades ferrisols-vertisols (ensemble K). Les unités de l'ensemble K vont prendre tantôt la couleur rouge de l'ensemble des ferrisols (ensemble G) si leurs caractéristiques chimiques et minéralogiques se rapprochent de celles des ferrisols, tantôt la couleur violette de l'ensemble des sols brun montmorillonitiques (ensemble I) si leurs caractéristiques se rapprochent plutôt de ces derniers. L'utilisation du code couleur a également son importance pour les pentes supérieures à 20%. Du fait de la pente forte, les sols peuvent être localement tronqués ou remaniés, avec mélanges d'horizon provenant d'un même type de sol ou de sols différents. Dans ce dernier cas, Colmet-Daage l'a indiqué sur la carte en alternant les deux couleurs au niveau des traits obliques ou des points.

D'autres distinctions localisées, seulement pour certains ensembles de sol, sont signalées en exposant au niveau des attributs des unités. Il s'agit de modifications locales du modelé du terrain, entraînant soit des susceptibilités particulières du type de sol considéré, soit des contraintes pour la mécanisation. Ainsi, les sols sableux sur cendres volcaniques et sur ponces des ensembles J et P (concernés en majorité par ses caractéristiques supplémentaires) sont très sujets à l'érosion. Pour ceux-ci, Colmet-Daage a précisé le modelé du terrain en indiquant les zones convexes facilement érodibles ainsi que les zones concaves avec tendance à l'accumulation.

Les entités de sol de Colmet-Daage sont bien définies et suffisamment précises pour que l'on puisse les utiliser telles quelles. Nous avons donc choisi de garder la dénomination de Colmet-Daage en ce qui concerne les ensembles de sol. Par contre, la désignation des faciès de sols au sein de chaque ensemble a été simplifiée, pour ne garder que les critères pédologiques les plus marquants et déterminants.

La dénomination des entités pédologiques a été laissée sous le référentiel de la CPCS, utilisé par Colmet-Daage. En effet, il s'avère que le Référentiel Pédologique, mis en place en 1995 et qui était sensé remplacer la CPCS, ne peut être appliqué pour les sols de la Martinique, puisqu'il

n'existe pas d'appellation des sols tropicaux sous le Référentiel Pédologique. La correspondance entre Colmet-Daage/CPCS et le Référentiel Pédologique ne peut donc être établie pour les sols de la Martinique.

3.1.2 La numérisation de la carte des sols de la Martinique

Afin de numériser la carte des sols de la Martinique de Colmet-Daage, plusieurs données sont à disposition au sein de l'unité Valpédo de l'IRD de Montpellier. Les segments de la carte ont tous été scannés, ce qui représente 38 scans, et préalablement géoréférencés avant d'être importés dans le S.I.G. utilisant le logiciel ESRI ArcGIS 9 version 5.1. La projection employée est celle courante pour la Martinique, à savoir le système de coordonnées 439488_martinique_utm_ft_desaix. A disposition également, la légende de la carte des sols de la Martinique, ainsi que la description des profils caractérisés en Martinique (Colmet-Daage et al., 1970).

Constitution de la table attributaire associée aux données

Dans le S.I.G. chaque unité de sol est représentée par un polygone (objet graphique) dont sa définition est renseignée dans une table attributaire (objet sémantique). Cette table attributaire comporte un certain nombre de champs (intitulés des colonnes), qui doivent être choisis de façon exhaustive en fonction de la donnée contenue dans chaque unité, sans perdre l'information et sans l'altérer. Il a fallu également s'attacher à respecter la hiérarchisation choisie par Colmet-Daage dans l'énoncé des types de sols dans la construction de la table attributaire. Ainsi, la succession des champs (notés en gras dans la liste ci-dessous) reprend celle-ci, cependant retravaillée pour adhérer aux contraintes informatiques liées à l'exploitation du S.I.G. A ces champs de données pédologiques ont été ajoutés ceux concernant la donnée paysage pour être plus tard corrélés à la partie « environnement » de la base de données VALSOL.

- **asso_carto** : regroupe toutes les unités cartographiques renseignées par deux ou plusieurs types de sols différents, réparties au sein du polygone sans association directe. L'unité sera répertoriée dans l'ensemble de sol dominant. Cas particulier : les associations contenant entre autres des intergrades K seront renseignées dans l'ensemble correspondant à la tendance (ex : asso Kd Gc avec tendance G renseignée G dans ensemble_sol) ;
- **unites_complexes_sols** : regroupe toutes les unités cartographiques renseignées par deux types de sols différents, séparés par un trait d'union. Ce sont des sols polyphasés. La première lettre indiquée est le type de sol issu de la roche-mère la plus récente, et sus-jacent. Elle fait référence à l'ensemble de sol codifié par cette lettre ;
- **tendance** : ce champ indique la couleur représentée sur la carte de chaque unité. Pour les pentes fortes, deux ensembles de sol peuvent coexister issus de mélanges d'apports, représentés graphiquement par des bandes de couleur différentes en alternance, et indiqués ici par deux tendances (ex : I/G) ;
- **ensemble_sol** : ensemble de sol, 1ère lettre, majuscule ;
- **sousens_sol** : ce niveau de hiérarchisation des sols n'existe pas chez Colmet-Daage. Il a été créé pour synthétiser certains ensembles de sols (ensembles A, J, P, H, T) ;
- **facies_sol** : faciès de sol au sein d'un même ensemble, 2ème lettre, minuscule. Les ensembles sont divisés en différents faciès ;
- **sousfacies_sol** : sous-faciès de sol au sein d'un même faciès, 3ème lettre, minuscule ;
- **variante** : le plus petit niveau de hiérarchisation dans la légende de Colmet-Daage ;
- **surf_ha** : calcul de la surface en hectare de chaque polygone. L'hectare a été choisi comme unité de mesure référente car jugé plus pertinent que le km², compte tenu de la faible superficie de la majorité des polygones ;

- **commentaires** : ce champ permet d'indiquer toutes les unités cartographiques qui posent problème sur le document original, soit par erreur de transcription, soit par manque d'information dans la légende

Si à grande échelle (1/20000^{ème}), la totalité de l'information est utile à la compréhension de la donnée pédologique, il n'en va pas de même aux petites échelles (1/100000^{ème} et au-delà). Au contraire dans ce dernier cas, indiquer toutes les subdivisions concernant le type de sol complexifie la lecture, et cette vision trop « pointilliste » masque les grandes tendances pédologiques, plus pertinentes à petite échelle. Cette constatation nous a logiquement amené à procéder à cette classification de l'information pédologique au niveau de la table attributaire. Le fait de séparer l'information en plusieurs champs comporte plusieurs avantages. D'abord cela permet de simplifier la lecture : nous avons vu que le choix de représentation des données topographiques et pédologiques de Colmet-Daage est relativement complexe, puisqu'il associe à la fois des codes couleur, des figurés et des attributs sémantiques. Séparer ces données au niveau de la table attributaire donnera à l'utilisateur du S.I.G. la possibilité de s'y retrouver, et de n'afficher que les données voulues, que ce soit la pente ou le type de sol. De plus, il est possible de produire des cartes pédologiques « à la demande » en fonction de l'échelle choisie, et de ne faire apparaître alors que les niveaux de hiérarchisation les plus pertinents.

3.1.3 Les métadonnées

Aux données géospatiales, il est recommandé d'y associer leurs métadonnées. Ces dernières sont, littéralement, des données sur des données. Elles décrivent le contenu, le type, la nature, la référence spatiale, la qualité, la disponibilité et d'autres caractéristiques des données géographiques. Les métadonnées revêtent une grande importance du fait que les données spatiales gérées dans un S.I.G. ne s'expliquent pas d'elles-mêmes. Lorsque les métadonnées manquent, les données spatiales ne sont plus aussi parlantes et ne peuvent plus être utilisées que de façon restreinte. De même, il n'y a plus de référence reconnue des auteurs du S.I.G. et des métadonnées associées. Les métadonnées doivent permettre une gestion et une utilisation judicieuse et pertinente des données. Elles deviennent ainsi un outil indispensable pour (1) faciliter les recherches d'informations, (2) partager et échanger des informations relatives aux SIG, entre unités de recherche mais également vers l'extérieur, (3) faciliter la gestion et l'archivage des géodonnées, (4) gérer et protéger les droits de propriété intellectuelle et de copyright (ICDG, 2006).

Les métadonnées doivent être organisées selon une norme internationale servant de référence : la norme ISO 19115 : 2003. Celle-ci définit les informations que l'on peut mettre à disposition pour décrire la donnée géospatiale, en les organisant par classe (ADAE, 2006) :

- Informations d'identification:
 - intitulé, description, dates de référence, version, résumé, intervenants, auteurs...
 - L'étendu des données
 - Des aperçus sur les données
 - Informations sur les emplois possibles
 - Contraintes légales et de sécurité, ...
- La description du contenu
- Le système de coordonnées
- Les informations de géolocalisation et d'organisation des données
- Des informations de qualité (ou de qualification)
- Des mesures de qualité
 - précision géométrique, temporelle et sémantique,
 - exhaustivité,

- cohérence logique
- Des informations de généalogie :
 - Description des sources
 - Description des processus appliqués aux sources
- Les modalités d'affichage (légendes)
- Les modalités de diffusion
- Les modalités de maintenance.

Le logiciel ArcGIS 9, grâce à son application ArcCatalog qui permet l'organisation et la gestion des bases de données géographiques, offre la possibilité de renseigner ces métadonnées sous la norme ISO 19115 : 2003, pour chaque couche d'information associant unités cartographiques et table attributaire correspondante (ou feature class), chaque table attributaire (ou shapefile), chaque représentation graphique (ou layer) et chaque carte extraite sous format image (ou dataset).

En annexe de ce document se trouve le fichier de métadonnées créé à partir de l'application ArcCatalog du logiciel ArcGIS 9, concernant la couche d'information (table attributaire et unités cartographiques associées) mise en place pour la numérisation de la carte des sols de la Martinique au 1/20000^{ème} de Colmet-Daage.

3.2 Résultats

3.2.1 Présentation du S.I.G.

Le S.I.G. utilise le logiciel ESRI ArcGIS 9 version 5.1. Une géodatabase a été créée sous le système de projection 439488_martinique_utm_ft_desaix, rassemblant toutes les couches de données numérisées. Ces couches renseignent à la fois sur la donnée géographique (points, polygones) et sur la donnée sémantique (table attributaire) :

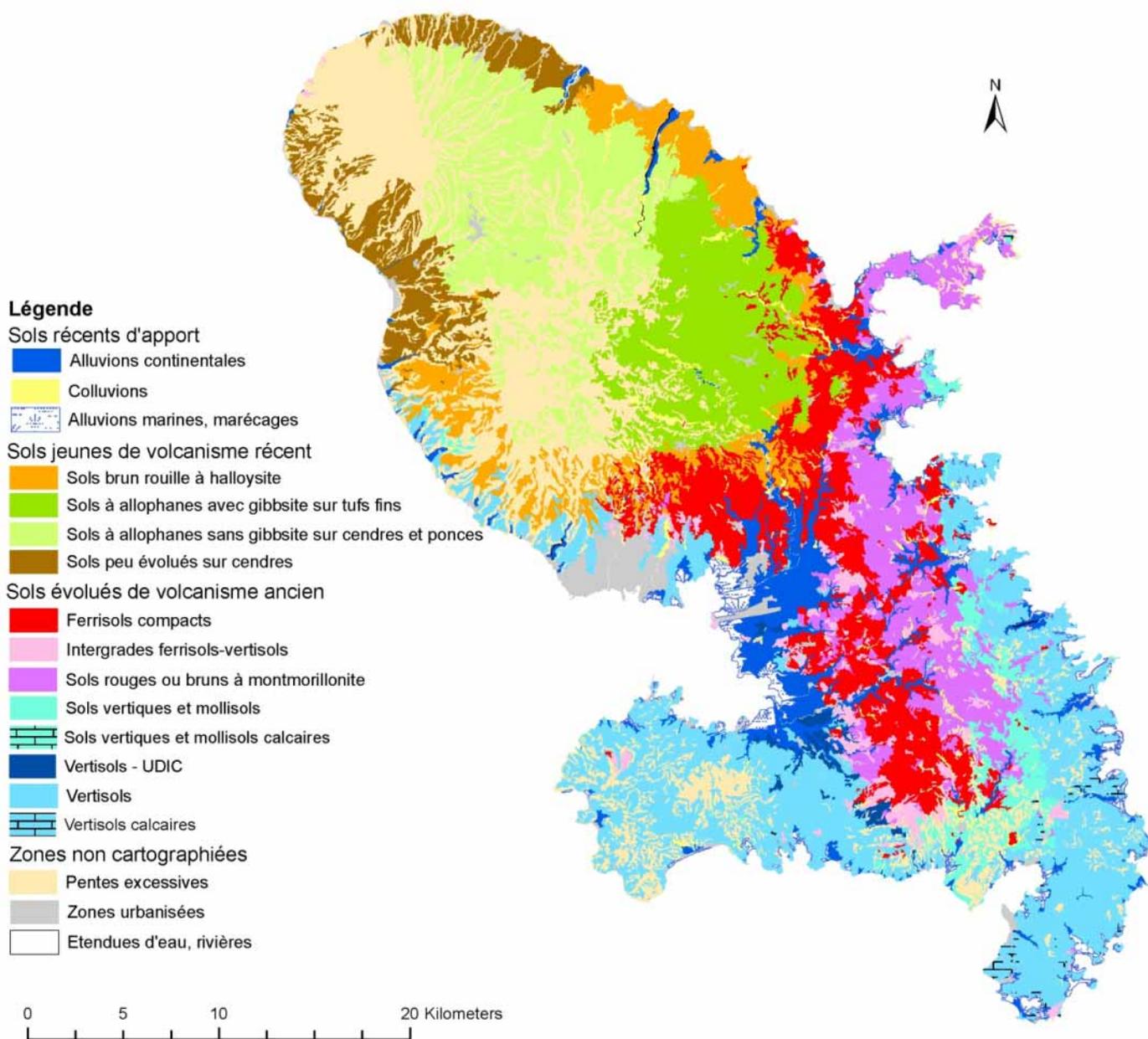
- la couche **points_fd** : répertorie les points de calage du système de coordonnées 439488_martinique_utm_ft_desaix, qui servent au géoréférencement des 38 scans représentant la carte des sols
- la couche **MTQ_unites_sols** : c'est la couche principale répertoriant toute l'information géographique et pédologique contenue sur la carte des sols au 1/20000^{ème} de la Martinique de Colmet-Daage (types de sol avec leurs différents niveaux hiérarchiques de détermination).

3.2.2 Comparaison des entités pédologiques créées par Colmet-Daage avec celles finalement numérisées

Lors de la hiérarchisation de la donnée pédologique, la numérisation de la carte a fait apparaître des divergences entre la légende initiale de Colmet-Daage (cf tableau 1) et les unités de sol cartées Figure 7. Le tableau 2 recense les entités pédologiques effectivement numérisées. On remarque tout d'abord que de nouveaux ensembles ont été créés par rapport à ceux qu'avait précédemment défini Colmet-Daage. Ceci s'explique par le fait que (1) l'utilisation d'un S.I.G. amène quelques contraintes dans l'attribution des polygones. Ainsi, il a été nécessaire d'affecter un nom d'ensemble de sol aux unités cartographiques de couleur bistre représentant les zones non cartographiées par Colmet-Daage du fait d'une pente excessive, ainsi qu'aux zones urbanisées, bien que celles-ci ne soient pas des unités pédologiques. Elles ont été notées Y pour les premières, X pour les deuxièmes. On peut cependant considérer que sur l'ensemble Y, du fait de la pente supérieure à 50%, les sols présents sont des lithosols, le reste étant constitué d'affleurements rocheux. Ensuite, (2) des mollisols et sols vertiques calcaires ont été cartés par Colmet-Daage sans être référencés dans la légende. Pour ces derniers, il nous est apparu nécessaire de les indiquer au

niveau hiérarchique le plus haut (sous le nom d'ensemble Nca), pour respecter la même classification que Colmet-Daage avait appliqué pour distinguer les vertisols (ensemble V) des vertisols calcaires (ensemble Vca).

MARTINIQUE - Ensembles de sols



D'après la carte des sols au 1/20000ème de Colmet-Daage, 1969

Figure 7 : Représentations cartographiques de la donnée pédologique

TABLEAU 2 : ENTITES PEDOLOGIQUES REPRESENTÉES SUR LA CARTE UNE FOIS NUMÉRISÉE

Dénomination	Ensembles de sols	Sous-ensembles	Faciès	Sous-faciès	Variantes	Associations cartographiques	Sols polyphasés
Alluvions continentales	A	3	9	5	12	30	0
Colluvions	B	0	31	4	4	5	0
Alluvions marines, marécages	D	0	5	0	2	0	0
Sols bruns rouille à halloysite	H	3	4	14	4	27	16
Sols peu évolués sur cendres	J	4	16	0	6	8	14
Sols à allophanes sans gibbsite sur cendres et ponces	P	2	9	10	4	23	5
Sols à allophanes avec gibbsite sur tufs fins	T	0	6	0	0	8	10
Ferrisols compacts	G	0	9	1	2	38	28
Sols rouges ou bruns à montmorillonite	I	0	9	2	1	37	31
Intergrades ferrisols-vertisols	K	0	7	2	3	10	18
Sols vertiques et mollisols	N	0	4	2	3	6	10
Sols vertiques calcaires	Nca	0	1	0	1	0	0
Vertisols UDIC	U	0	3	2	4	2	4
Vertisols	V	0	5	5	5	46	19
Vertisols calcaires	Vca	0	4	14	5	0	0
Pentes excessives	Y	/	/	/	/	/	/
Zones urbanisées	X	/	/	/	/	/	/
TOTAL	17	12	122	61	56	240	155

On remarque tout d'abord que de nouveaux ensembles ont été créés par rapport à ceux qu'avait précédemment défini Colmet-Daage. Ceci s'explique par le fait que (1) l'utilisation d'un S.I.G. amène quelques contraintes dans l'attribution des polygones. Ainsi, il a été nécessaire d'affecter un nom d'ensemble de sol aux unités cartographiques de couleur bistre représentant les zones non cartographiées par Colmet-Daage du fait d'une pente excessive, ainsi qu'aux zones urbanisées, bien que celles-ci ne soient pas des unités pédologiques. Elles ont été notées Y pour les premières, X pour les deuxièmes. On peut cependant considérer que sur l'ensemble Y, du fait de la pente supérieure à 50%, les sols présents sont des lithosols, le reste étant constitué d'affleurements rocheux. Ensuite, (2) des mollisols et sols vertiques calcaires ont été cartés par Colmet-Daage sans être référencés dans la légende. Pour ces derniers, il nous est apparu nécessaire de les indiquer au niveau hiérarchique le plus haut (sous le nom d'ensemble Nca), pour respecter la même classification que Colmet-Daage avait appliqué pour distinguer les vertisols (ensemble V) des vertisols calcaires (ensemble Vca).

Si Colmet-Daage a précisé 8 sous-ensembles, nous en avons défini 12. Les 4 nouveaux concernent l'ensemble de sols J, pour lequel il s'est avéré nécessaire de réorganiser l'information pédologique. Les subdivisions des faciès initiaux, au nombre de 4, sont des distinctions au niveau de l'épaisseur du solum. Ce même critère de différenciation avait déjà été employé par Colmet-Daage pour l'ensemble de sols P, mais au niveau de l'entité pédologique « sous-ensemble de sol ». Afin d'appliquer toujours le même schéma de hiérarchisation, et ce quel que soit l'ensemble de sol, il nous est apparu plus logique de remonter la distinction des subdivisions des faciès de l'ensemble J au niveau des sous-ensembles.

L'affectation de la dénomination de chaque unité cartographique dans la table attributaire a mis en évidence de profonds changements dans la légende initiale de Colmet-Daage. Ces changements apparaissent principalement pour les plus petits niveaux hiérarchiques, à savoir le faciès, le sous-faciès et les variantes. Ainsi, 122 faciès de sol, tous ensembles confondus, ressortent

après numérisation, contre 81 initialement. L'augmentation du nombre est principalement due au fait que pour les sols colluvionnés, Colmet-Daage n'avait pas comptabilisé les faciès possibles, mais avait juste précisé en une phrase que ceux-ci dérivait d'un type de sol original rappelé par son code. La numérisation a permis de comptabiliser ces derniers, qui sont donc au nombre de 31. L'autre explication réside dans la création de nouveaux sous-ensembles pour les sols peu évolués sur cendres (ensemble J), entraînant la duplication du nombre de faciès possible (16, contre 5 originellement) qu'il a été obligé de rappeler dans chaque sous-ensemble. Enfin, certains faciès, sous-faciès et variantes indiqués dans la légende originale n'ont pas été repérés sur la carte après numérisation, et inversement. Le fait que la légende est identique pour les sols des deux îles (Martinique et Guadeloupe) pourrait expliquer cette différence.

3.2.3 Les ensembles de sols en quelques chiffres

La carte des sols de la Martinique au 1/20000^{ème} de Colmet-Daage représente, une fois numérisée, 12302 polygones ou unités cartographiques. Les ensembles de sol sont au nombre de 12296 unités, puisque 6 unités sont à attribuer aux étendues d'eau et aux rivières

La superficie totale des ensembles de sol représente 110311 ha, qui est très proche de la superficie totale de la Martinique (110337 ha). La différence de 26 ha provient des unités cartographiques figurant les étendues d'eau et les rivières, non comptabilisées dans les ensembles de sol.

Sols polyphasés de la Martinique

La particularité des sols de la Martinique, issus de formations volcaniques, réside dans la superposition de plusieurs matériaux parentaux. Colmet-Daage l'a très bien fait ressortir sur la carte des sols, en individualisant des sols polyphasés au niveau des unités cartographiques concernées. Par contre, si quelques profils complexes sont bien individualisés au niveau du faciès dans la légende, beaucoup n'y apparaissent pas et c'est à la lecture de la carte que ceux-ci sont visibles. Le tableau 3 indique les sols polyphasés mis en évidence pour chaque ensemble de sol, ainsi que la superficie de ces sols comparée à la superficie de chaque ensemble. La première lettre fait référence au sol sus-jacent dans le profil complexe, et l'unité est renseignée dans l'ensemble de sol correspondant. La deuxième lettre désigne le sol issu d'une phase pédogénétique plus ancienne ayant eu lieu sur le matériau parental ancien sous-jacent. Colmet-Daage a également choisi de caractériser certains sols d'un même ensemble en tant que sols polyphasés, ce pour mieux faire ressortir l'apparition d'un horizon particulier en profondeur, pouvant être diagnostique pour un autre faciès dans ce même ensemble de sol, et induisant alors des contraintes agronomiques particulières sur le sol polyphasé considéré.

TABLEAU 3 : ATTRIBUTION DES UNITES CARTOGRAPHIQUES DE SOLS POLYPHASES DE LA MARTINIQUE AU NIVEAU HIERARCHIQUE « ENSEMBLE DE SOL » ET PROPORTION DANS CHAQUE ENSEMBLE

Ensembles de sols	Sols polyphasés	% de la surface
A	/	0,00
B	/	0,00
D	/	0,00
H	H-H ; H-G ; H-K ; H-N ; H-P ; H-V	6,39
J	J-H ; J-P	10,22
P	P-P ; P-J ; P-T	1,69
T	T-T ; T-G ; T-H	21,29
G	G-G ; G-H ; G-I ; G-K ; G-K ; G-V	6,85
I	I-I ; I-G ; I-K ; I-N ; I-V	12,53
K	K-K ; K-G ; K-I ; K-N ; K-U ; K-V	12,69
N	N-G ; N-H ; N-I ; N-K ; N-V	12,76
Nca	/	0,00
U	U-A ; U-K	29,45
V	V-G ; V-H ; V-I ; V-J ; V-K ; V-N	0,84
Vca	/	0,00
Y	/	/
X	/	/
TOTAL		0,10

La plupart des sols issus de formations volcaniques, à part les sols calcaires il est vrai peu représentés en Martinique, peuvent présenter des profils complexes. En Martinique, l'ensemble de sol U (vertisols UDIC) est celui pour lequel on retrouve le plus de sols polyphasés, soit des remaniements de ce type de sol avec des alluvions continentales, soit au niveau des zones transitoires entre vertisols-UDIC et intergrades ferrisols-vertisols avec presque un tiers (30%) de sa surface. Viennent ensuite les sols à allophane avec gibbsite (ensemble T) avec 21% de leur surface en sols polyphasés. Les autres sols sur volcanisme récent présentent souvent des profils complexes : sols polyphasés de l'ensemble J (10% de la surface de cet ensemble), ainsi que de l'ensemble H (6,4%). Les formations volcaniques anciennes peuvent également supporter des sols polyphasés, particulièrement les sols des ensembles N, K et I avec un peu plus de 12% pour chacune de leur surface, et les ferrisols (ensemble G) avec 6,8%. Les vertisols, quant à eux, ont moins de 1% de leur superficie en sols polyphasés, apparaissant uniquement dans les zones de transition géographique avec d'autres ensembles de sol. Les profils complexes alors décrits par Colmet-Daage s'apparentent plus à des mélanges pédologiques entre vertisols et sols de l'autre ensemble, principalement au niveau de pentes pouvant être localement fortes.

Pour illustrer ce chapitre, nous avons choisi de présenter quelques sols polyphasés typiques de la Martinique :

- Up-Aaw : en régions plus humides que celles des vertisols francs, et à faible altitude, se développent des vertisols dégradés (présence de kaolinite) très argileux avec engorgement fréquent en eau. Ici est présenté un vertisol UDIC profond associé à des alluvions lourdes montmorillonitiques. Du fait de leur position géographique et de leurs caractéristiques pédologiques, ces vertisols s'apparentent aux alluvions continentales auxquelles ils sont combinés.
- Tb-Gd : les formations volcaniques récentes surmontent des formations volcaniques anciennes, conséquence de plusieurs éruptions consécutives. Dans le cas présent, le tuf dont dérive le sol à allophane est peu épais et le ferrisol sous-jacent apparaît à moins de 1 m de profondeur et parfois en affleurement sur les pentes. Le passage entre les deux types de sol a lieu en quelques centimètres.
- N-I : ces sols polyphasés forment transition entre les mollisols bruns eutrophes à tendance verticale et les sols brun rouge à montmorillonite sous-jacents, plus anciens et plus évolués.
- Kb-Gd : les sols de l'ensemble K étant déjà des intergrades entre vertisols et sols bruns montmorillonitiques, il est fréquent de les trouver associés le long d'un profil complexe.
- Id-In : ce sol particulier au sein de l'ensemble des sols bruns rouges montmorillonitiques, a été décrit par Colmet-Daage comme sol polyphasé pour mettre en évidence l'apparition de l'horizon à tendance verticale en profondeur, caractéristique du sol In.
- Jh-Pa : dans les régions volcaniques, on observe souvent des superpositions de cendres et ponces d'âge différent, issues des éruptions volcaniques successives, sur lesquelles un sol a pu avoir le temps de se développer entre deux éruptions. La Martinique présente bien évidemment ce cas de figure, et ici le sol polyphasé choisi représente un sol peu évolué sur cendres récentes, sableux et humifère, de faible épaisseur (de 20 à 35 cm), surmontant un sol à allophane lui aussi sableux, humifère et peu épais sur cendres.
- Hsg-Gd : les sols brun rouille à halloysite (ensemble H) n'ont parfois, sur les pentes, qu'une faible épaisseur de moins d'un mètre et se retrouvent alors en lambeaux épars, surmontant les sols rouges ferrallitiques beaucoup plus anciens lorsqu'on s'éloigne du volcan. Dans ce cas, c'est un sol à halloysite relativement évolué dans le temps,

argileux et issu d'un tuf blanchâtre peu durci, qui surmonte l'orthotype des sols rouges ferrallitiques.

Associations cartographiques

Un dernier type de représentation graphique apparaît sur la carte des sols de la Martinique au 1/20000^{ème} : il s'agit des associations cartographiques, non indiquées dans la légende de Colmet-Daage. Il y a passage progressif d'un type de sol à l'autre au sein d'une même unité cartographique, sans que Colmet-Daage n'ait pu tracer de limite franche entre ces deux types de sol. La majorité des ensembles de sol peuvent être concernés. Seuls les sols d'apports récents sur alluvions marines ne présentent pas d'associations cartographiques, ainsi que les vertisols et sols vertiques calcaires, ces derniers occupant une trop faible superficie pour que des associations cartographiques aient pu être caractérisées.

Le tableau 4 présente le nombre et la proportion d'associations cartographiques dans chaque ensemble de sol, ainsi que leur surface (en ha). Si en nombre d'unités, les associations cartographiques ne sont pas beaucoup représentées (2,7% de la totalité des unités), elles le sont plus en terme de surface (pas loin de 15900 ha, soit 14,4%). Ainsi, l'ensemble de sol présentant le plus de superficie en associations cartographiques est l'ensemble des sols T, avec 1/3 de sa surface en associations. Suivent ensuite les ensembles P et H, avec respectivement 29,3% et 28,6% de leur surface en associations cartographiques. Ainsi, les sols de volcanisme récent (ensembles T, P, H et J dans leur ordre décroissant) sont les plus concernés par la présence d'associations cartographiques, avec 7984 ha pour une surface totale d'associations cartographiques sur l'île de la Martinique de 15847 ha, soit un peu plus de 50%. Cela peut s'expliquer par le fait que d'une part le relief sur l'arc volcanique récent est accentué, avec de fortes pentes et que d'autre part ces sols sont jeunes, développés sur des successions de cendres meubles présentes sur les pentes sous forme de placages. Cette répartition particulière du matériau parental, couplée à de fortes pentes, n'a pas permis à Colmet-Daage de toujours distinguer de limite nette entre deux types de sol sur ces terrains, l'obligeant ainsi à cartographier plusieurs types de sol au sein d'une même unité.

TABLEAU 4 : PROPORTION DES ASSOCIATIONS CARTOGRAPHIQUES AU SEIN DE CHAQUE UNITE DE SOL ET DE CHAQUE ENSEMBLE

Ensembles de sols	Nb d'unités cartographiques	dont Nb d'associations cartographiques	% d'associations cartographiques dans l'ens. de sol considéré	Surface (ha) des associations cartographiques	% de la surface des asso. carto. dans chaque ensemble
A	385	33	8,57	1661,49	27,79
B	140	5	3,57	63,28	6,16
D	239	0	0,00	0,00	0,00
H	709	40	5,64	1801,14	28,60
J	742	8	1,08	211,25	4,39
P	1043	32	3,07	3051,80	29,26
T	671	20	2,98	2919,84	33,47
G	1364	60	4,40	2645,53	23,22
I	1111	54	4,86	1884,15	24,48
K	482	11	2,28	200,82	7,36
N	496	8	1,61	257,15	8,92
Nca	5	0	0,00	0,00	0,00
U	73	2	2,74	9,06	1,36
V	3775	58	1,54	1141,50	6,08
Vca	131	0	0,00	0,00	0,00
Y	574	/	/	/	/
X	356	/	/	/	/
Rivières	6	/	/	/	/
TOTAL	12302	331	2,69	15847,00	14,37

C'est également la complexité de la répartition spatiale des matériaux alluvionnaires qui a forcé Colmet-Daage à cartographier près de 28% de la surface des sols sur alluvions continentales en

associations cartographiques. En ce qui concerne les sols sur volcanisme ancien, plus évolués, il a semble-t-il été plus facile de tracer une limite franche entre deux types de sol. Le degré d'évolution du profil permet effectivement de distinguer plus facilement la transition entre deux faciès et/ou deux ensembles, grâce à la couleur, la présence de certains traits pédologiques remarquables ou encore la présence d'horizons caractéristiques. De plus, les reliefs sont moins accentués que pour le Nord de l'île et les pentes sont en général moins fortes, limitant les mélanges, les transitions trop floues et les glissements par solifluxion. Ainsi, les ferrisols et les sols à montmorillonite (ensembles G et I) présentent moins de 25% de leur surface en associations cartographiques, alors que les autres sols évolués sur volcanisme ancien (ensembles N, K, V et U) ont respectivement 8,9%, 7,4%, 6,1% et 1,4% de leur surface en associations cartographiques. Ces associations sont situées, comme pour les sols jeunes sur volcanisme récent, sur des versants à pentes relativement fortes.

Nous avons vu que deux grands cas d'associations cartographiques se présentent :

- au niveau des alluvions continentaux : Colmet-Daage n'a pu tracer de limites nettes sur ces formations, de par la complexité de celles-ci ;
- selon la pente.

3.3 Conclusion Représentation cartographique

La numérisation de la carte des sols au 1/20000^{ème} de la Martinique une fois achevée, tant au niveau de la création des unités cartographiques (polygones) que de la table attributaire associée, il devient possible d'extraire des données pédologiques adaptées à la demande et à l'échelle voulue. La carte des sols telle que l'a conçue Colmet-Daage se prête parfaitement à ce type de représentation, les niveaux hiérarchiques des types de sol étant corrélés à des facteurs d'échelle. Ainsi, pour une visualisation globale à petite échelle des sols de la Martinique, on préférera afficher le plus haut niveau de hiérarchisation de la donnée pédologique définie par Colmet-Daage, à savoir les ensembles de sols. La figure 1, la carte des ensembles de sols de la Martinique, illustre cette transcription. Cette représentation équivaut à une échelle de 1/333000^{ème}.

3.4 Bibliographie

Agence pour le Développement de l'Administration Electronique (ADAE), 2006, Information Géographique - Recommandation relative aux métadonnées, document de travail du Ministère du Budget et de la Réforme de l'Etat, 56 p.

Carte des sols à 1/20 000 de la Martinique / par F. Colmet Daage ; interprétation des photogr. aériennes et mise au net des maquettes par J. Bernard ; analyses des sols au laboratoire par J. et M. Gautheyrou ; avec le concours de F. Lagache, J. de Crécy, A. Poumaroux, A. Pallud. - Fort de France (MTQ) : ORSTOM, Office de la recherche scientifique et technique outre mer, Centre des Antilles. Bureau des sols ; Fort de France (MTQ) : Secrétariat général des départements d'outre mer, Préfecture de la Martinique. Direction de l'agriculture, 1970. - 1:20000. - 24 cartes en coul. h.t. ; 26 x 70 cm.

Colmet-Daage F., 1969. Légende de la carte des sols des Antilles (Guadeloupe – Martinique) au 1/20 000 (partie volcanique).

Colmet-Daage F., Lagache P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. Cahiers ORSTOM, Vol. III, fasc. 2, p. 91-121.

Colmet-Daage, Francois; Gautheyrou, Jacques; Gautheyrou, Michele, 1970. Sélection de profils des Antilles avec rattachement à la classification des sols des Antilles au 1/20 000 (1960-1970) : Martinique volcanismes ancien et récent, Guadeloupe volcanismes ancien et récent. ORSTOM, Pointe-à-Pitre (GP), 1199 p. multigr., tabl.

Colmet-Daage F., 1977. Carte des sols au 1/150.000 in LASSERRE G. (dir.), 1977. Atlas des départements français d'outre-mer. Volume 2, la Martinique. CEGET Paris, IGN Bordeaux.

Centre d'Etudes de Géographie Tropicale (CNRS), Institut Géographique National (IGN), 1976, carte de l'oro-hydrographie au 1/150 000 in LASSERRE G. (dir.), 1977. Atlas des départements français d'outre-mer. Volume 2, la Martinique. CEGET Paris, IGN Bordeaux.

Di Leonardo S., 2005. Intégration de données volcaniques insulaires tropicales dans une base de données pédologiques : cas de la Martinique. Rapport de DAA. ENSAT, IRD.

<http://www.geoconnections.org/> : Infrastructure Canadienne de Données Géospatiales (ICDG), formation en ligne de l'ICDG.

IV. MISE EN PLACE DES OUTILS D'ELABORATION ET DE GESTION DU SIRS-SOLS REALISES PAR LE PROJET

4.1 Kamel^x, modèle de simulation du fonctionnement hydrostructural d'un pèdon

4.1.1 Présentation du modèle⁵

Nous avons vu au chapitre précédent que l'unité primaire de sol était représentée par le pèdon, quantitativement définie par son fonctionnement hydrostructural (en fait les 3 fonctions d'état thermodynamiques de la pédostructure de ses horizons: entropie spécifique, volume spécifique et potentiel de l'eau du sol, en fonction de la teneur en eau). Nous avons vu aussi que cette définition donnait les moyens conceptuels d'identification d'un type de sol et d'en optimiser la délimitation sur le terrain d'après la géomorphologie et le bioclimat en surface, en application de l'approche systémique.

Il devenait alors possible d'élaborer, selon cette même approche systémique, le modèle informatique correspondant à l'unité primaire de sol: un modèle reproduisant fidèlement le fonctionnement hydrostructural de l'organisation interne du pèdon représentatif de cette unité.

La toute première version du modèle (E. Braudeau, 2006) a été écrite dans l'environnement de programmation Simile[®] (simulistics.com). Il a été déposé sous le nom de *Kamel* à l'Agence pour la protection de Programmes sous le numéro : IDDN.FR.001.390019.000.S.P.2006.000.31500). Il représente la version de base, en 1D, de la modélisation physique du fonctionnement hydrostructural du sol adaptée à tous les types de sol. Il contient et reflète tous les principes théoriques (variables, équations, paramètres, relations entre paramètres pédohydriques) à la base du nouveau concept de « pédostructure » et, par là même, du nouveau paradigme de la physique du sol mis en place par le professeur R. H. Mohtar de l'Université de Purdue (USA) et moi-même depuis 2004 (Braudeau *et al.* 2004a,b ; Braudeau et Mohtar, 2004, 2006). Le document (Braudeau *et al.*, 2007)⁵ mis en annexes de ce rapport fait la synthèse de la théorie sur les fonctions de la pédostructure et donne une présentation du modèle. Par ailleurs la version Simile[®] du modèle Kamel[®] vient d'être traduite en langage C++ par Pierre Martin (Cirad) afin d'être incorporée comme module sol-eau du modèle agronomique intégré APES (Agricultural Production and Externalities Simulator) du programme européen SEAMLESS (http://www.seamless-ip.org/Reports/Report_28_D3.2.19.pdf).

Kamel[®] diffère radicalement des autres modèles sol-eau en ce sens qu'il est capable, avec un degré d'approximation ne dépendant que de la richesse de l'information entrante, de fournir les mêmes informations que celles demandées habituellement à ces modèles mais aussi de **décrire le fonctionnement interne** du pèdon, de son organisation hiérarchisée (de l'horizon à l'agrégat primaire) en interaction avec l'eau et l'air qui transitent et varient en quantités.

Ainsi, Kamel[®] simule la dynamique et la répartition de l'eau dans le sol : son infiltration sous apport d'eau (pluie, irrigation) ; son partage entre le plasma argileux des agrégats primaires (microporosité) et la porosité inter-agrégats (macroporosité) ; l'évaporation à la surface du sol, la

⁵Cette section se réfère directement aux documents suivants reproduits en Annexes :

- **Soil water - soil structure interactions: new concepts and their modeling.** E Braudeau, R.H. Mohtar, N. El Ghezal, M. Crayol, P. Clouvel, E. Jallas, and P. Martin. European Journal of Soil Science (submitted, 2007).
- **User's guideV6M.doc** par P. Martin et E. Braudeau (2006).
- **Liste des variables Kamel1D.doc** par E. Braudeau et M. Crayol (2006).

remontée capillaire, l'extraction de l'eau par les racines à chaque profondeur en fonction son état hydrostructural, du pourcentage racinaire et de la demande évaporative de la plante.

Il calcule et donne donc à chaque pas de temps en tout point du sol y compris la surface : le flux d'eau qui transite d'une couche à l'autre (macro-macro) et le flux d'eau interne à la pédostructure, dans la couche d'eau considérée, entre les deux systèmes poraux (micro-macro); les contenus en eau et en air des 2 systèmes poraux de la pédostructure ; la réserve en eau du sol intégrée sur une épaisseur donnée et l'état de saturation de cette réserve ; de même que l'aération, la teneur en eau à la capacité au champ, à saturation, au point de flétrissement temporaire et permanent.

Enfin conjointement à la dynamique de l'eau, Kamel® simule la dynamique de l'organisation structurale et calcule à chaque pas de temps le volume poral spécifique des agrégats primaires, de la pédostructure et de l'horizon de sol ; ce qui permet de connaître l'état hydrostructural du milieu ainsi que la dynamique et l'état d'ouverture de la fissuration verticale à partir de la surface créée par le dessèchement.

Le point fondamental à souligner est le fait que Kamel® gère les deux variables d'état W (teneur en eau gravimétrique) et \bar{V} (volume spécifique de la pédostructure) alors que les modèles Sols-eau actuels, fondés sur la notion de REV, ne gère que la variable d'état θ , teneur en eau volumétrique, qui est une variable macroscopique et non de processus (cf. Figure 3) et qui en plus masque la variable d'organisation \bar{V} dans la relation $\theta = \rho_w W / \bar{V}$. Gérer le volume spécifique de la pédostructure, \bar{V} , donne la possibilité de modéliser la thermodynamique du milieu « solide-eau-air » organisé du sol, ainsi que la variation de cette organisation avec la teneur en eau, comme par exemple les cycles d'ouverture-fermeture des fissures et fentes de retrait des sols in situ, et les problèmes que ces processus impliquent pour l'agriculture (chemins préférentiels de l'eau).

Etant entièrement basé sur des équations physiques (non empiriques) de l'interaction sol-eau, et sur des paramètres signifiants et mesurables, Kamel^x ne nécessite aucune calibration si tous les paramètres sont mesurés. Cela confère au modèle les deux aptitudes suivantes auxquelles ne peuvent prétendre les autres modèles sol-eau existants :

- *Caractériser localement à toute profondeur l'état thermodynamique du « milieu sol », siège des processus biologiques et géochimiques qui peuvent ainsi être étudiés en relation avec leur environnement physique (température, disponibilité de l'eau et de l'air) ;*
- *Effectuer le transfert d'informations de l'échelle du processus dans le sol (in situ ou au laboratoire) à l'échelle macroscopique ou synthétique de leur appréhension par l'homme à la surface du sol (modélisation spatiale des données).*

Ces deux propriétés du modèle lèvent un verrou important dans le domaine du couplage mécaniste des modèles biologiques et géochimiques avec le sol qui doit se faire à l'échelle du processus au sein de la structure du sol ; et du transfert d'échelle entre l'expérimentation en laboratoire et la modélisation au champ.

On trouvera en Annexes 2 documents sur Kamel^x : 1) Le guide de l'utilisateur et 2) la liste des variables et paramètres du modèle (Braudeau et Martin, 2006). Les principes du modèle, les détails de calcul et un exemple de simulation sont explicités dans l'article de Braudeau et al. (2007) mis en Annexes.

La figure 7 présente l'organisation du modèle en modules d'entrée des paramètres, de calcul et de sortie des variables d'état (de SREV, locales) et de stock (de REV, volumétriques). Les paramètres d'entrée caractéristiques du sol, nécessaires et suffisant pour faire tourner le modèle sont au nombre de 15 ; ils sont présentés dans le tableau suivant (Table 5). Leur détermination en laboratoire fait l'objet du paragraphe suivant.

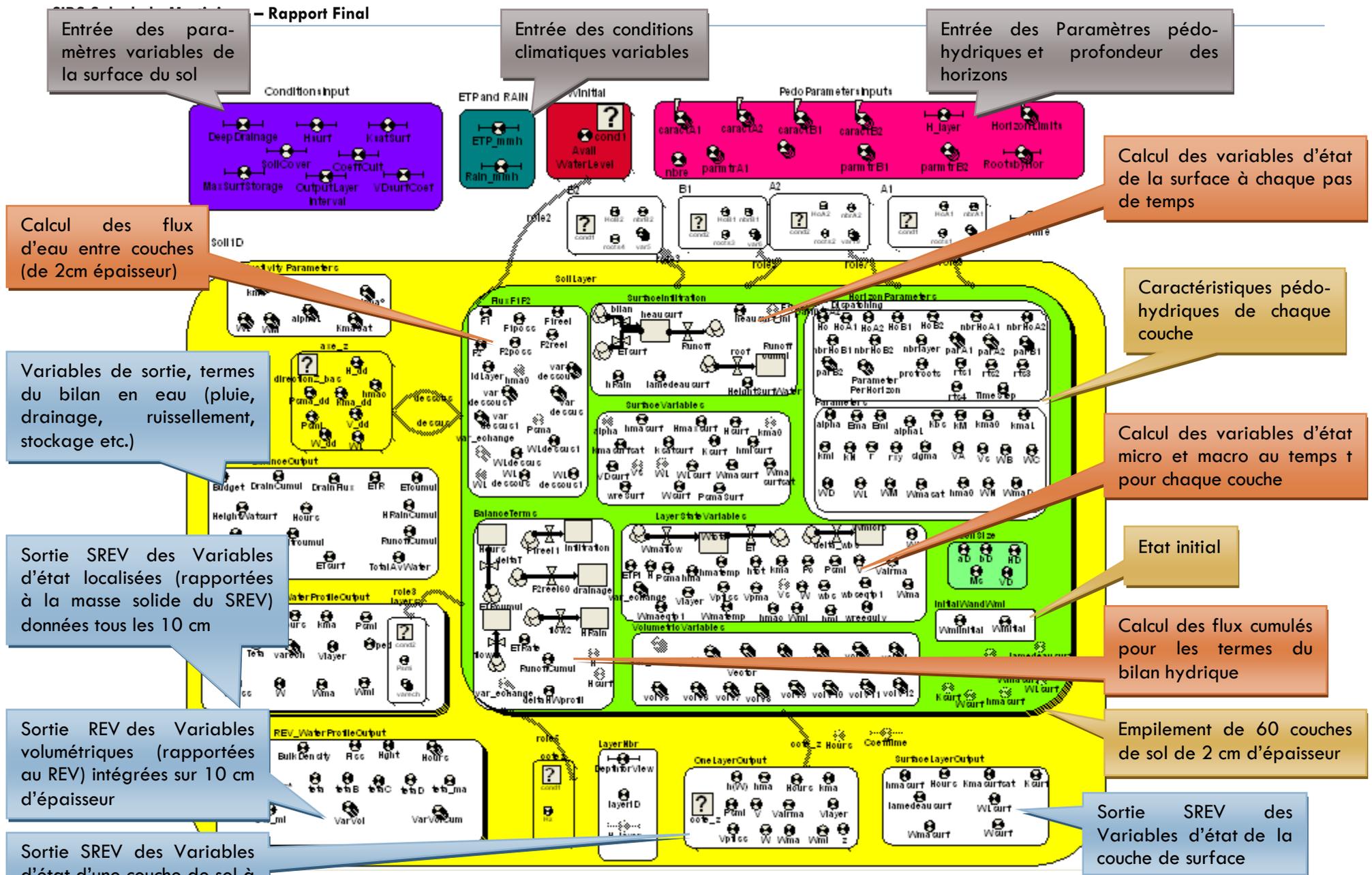


Figure 8: Structure du modèle Kamel1D en sous-composants : au dessus, les paramètres d'entrée (rouge vert et bleu); l'empilement des couches de sol en vert dont on voit la première avec ses composants internes; enfin les variables de sortie sous différentes formes, tout autour dans le sous-composant « Soil1D » jaune.

TABLE 5: LISTE DES 15 PARAMETRES DE LA PEDOSTRUCTURE NECESSAIRES EN DONNEES D'ENTREE DU MODELE KAMEL^x.

Parameter	unit	kind	used in	name
V _D	dm ³ /kgsoil	S _h C	V(W)	Pedostructure specific volume at wet state
W _N	kgwater/kgsoil	S _h C	w _{bs} , P _{smi}	Pedostructure specific water content at point N
W _M	"	S _h C	w _{st} , W _{ma} , h _{ma}	" " at point M
W _{sat}	"	S _h C	"	" " at point L (saturation)
k _N	kg soil/kg water	S _h C	w _{re} , w _{bs}	Constant of equilibrium between w _{bs} and w _{re} ,
k _M	"	S _h C	w _{bs} , w _{st} , W _D , W _C	and w _{bs} and w _{st} , during drying
K _{bs}	kg soil/dm ³ soil	S _h C	V(W)	Scaling ratio between pedostructure and prim. peds
E _{ma}	joules/kg soil	TC	h _{ma} (W _{ma})	Potential energy of the external surface of pr. peds
Sigma	kg water/kg soil	TC	h _{ma}	skin water at the surface of primary peds
K _{ma} ^o	dm/s	CC	k(W _{ma})	Hydraulic conductivity at dry point of macroporosity
k _{Sat}	dm/s	CC	"	Hydraulic conductivity at saturation
α _L	kg soil/kg water	CC	"	Constant of the exponential increase of k _{ma} with W _{ma} near water saturation
α ^o	kg soil/kg water	CC	"	Constant of the exponential increase of k _{ma} with W _{ma} near W _{ma} = 0
E _{mi}	joules/kg soil	S _w C	h _{mi} , P _c , P _{smi}	Potential energy of the internal surfaces of pr. peds
k _{mi}	kg wat/kg soil/kPa/s	S _w C	V(t), dw _{bs} /dt	Exchange rate coefficient between W _{mi} and W _{ma}

Les sigles représentent les courbes caractéristiques auxquels ces paramètres font référence : S_hC = Shrinkage curve, TC = tensiometric curve, CC = Conductivity Curve et S_wC = Swelling Curve (with time)

4.1.2 Caractérisation idéale et caractérisation approchée d'un sol pour sa modélisation hydro-structurale

Le modèle Kamel^x étant un modèle complet du fonctionnement hydrostructural du sol, ses paramètres au nombre de 15 (Tableau 5) constituent ses caractéristiques premières indépendantes ; ce sont les paramètres des 4 courbes déjà mentionnées, dont les trois premières suivantes sont bien connues en science du sol: la courbe de retrait, de potentiel, de conductivité et de vitesse de gonflement. La mesure de ces quatre courbes est présentée à la section suivante. Pour en extraire les paramètres avec précision, les courbes doivent être mesurées en continu, ce qui a demandé la mise au point du protocole de mesure pour certaines d'entre elles et l'adaptation de méthodes existantes pour d'autres.

Si tous les paramètres sont mesurés, le modèle n'a théoriquement pas besoin d'être calibré au champ puisque les 4 fonctions de base du sol sont déterminées. C'est pourquoi on peut parler de « Caractérisation idéale d'un sol » quand tous les paramètres d'organisation et de fonctionnement permettant de simuler l'activité interne et externe du pedon ont été mesurés. Aux 15 paramètres de la pédostructure (Tableau 5) il faut rajouter quelques autres relatifs à la relation d'échelle entre la pédostructure, l'horizon et le pedon (% cailloux > 4mm, épaisseur et profondeur des horizons, porosité biologique, cf. Braudeau et al. 2007, Annexe A.).

A partir de la détermination de ces 15 paramètres, les propriétés des sols couramment utilisées en agriculture comme la réserve en eau, la capacité au champ, la friabilité, le point de plasticité, etc. sont toutes calculables (Braudeau et al. 2005). Inversement, il est possible d'estimer les paramètres pédohydriques à partir des informations courantes que l'on trouve dans les bases de données du sol traditionnelles. On peut donc aussi utiliser les fonctions pedotransfers pour donner à partir de la texture et de la Matière organique, des valeurs approchées des paramètres des courbes caractéristiques.

C'est ainsi que nous avons mis au point un « traducteur » : KamelSoil^x, capable avec l'aide des fonctions pedotransfers, de transformer les informations courantes trouvées dans les « bases de donnée Sol » en ce jeu de 15 paramètres idéaux. Le minimum d'information à rentrer dans KamelSoil^x est la texture de l'échantillon; mais le degré d'approximation des résultats sera fonction de la richesse des informations sur le sol étudié.

La feuille Excell relative à KamelSoil^x est donnée en Annexe B1 Matériel. Là aussi il s'agit d'un prototype qui peut devenir un utilitaire très important en science du sol permettant de comparer un modèle empirique à calibrer au modèle non empirique Kamel^x.

4.2 Chaîne de mesure des paramètres de la pédostucture

On se reportera au dossier « Notices de Laboratoire » en Annexes pour connaître en détails les protocoles expérimentaux concernant 1) la préparation de l'échantillon, 2) la mesure de la courbe, 3) la formulation des résultats et 4) l'extraction des paramètres de la courbe modélisée à l'aide d'un software utilisant Excel et son solver. Les protocoles de mesure et surtout d'extraction des paramètres à l'aide du software spécifique sont actuellement à l'état de prototypes. Les softwares ont été améliorés depuis la rédaction des notices (06/2006) et sont maintenant conformes à la description qui est faite dans l'article (Braudeau et al. 2007) en annexe A., des courbes et concepts qui sous-tendent les principes de détermination des paramètres par KamelSoil^X.

4.2.1 Rétractométrie ou mesure de la courbe de retrait en continu⁶

La mesure consiste à enregistrer le poids, le diamètre et la hauteur de l'échantillon de sol au moment où il est déposé sur la balance par le passeur d'échantillons (Figure 9).



Figure 9. Rétractomètre (Braudeau et al. 1999)

L'expérimentation se déroule automatiquement dans une l'enceinte thermostatée à 40°C. Les échantillons se dessèchent régulièrement, passant de l'état saturé à l'état sec en 2 à 5 jours dépendant de la texture et du type d'argile.

La courbe de retrait obtenue est ensuite analysée afin d'en extraire les paramètres de modélisation caractéristiques de l'organisation du sol (Braudeau et al. 2004).

La figure 10 montre en exemple trois courbes de retrait de formes différentes, la première d'un sol argilo limoneux peu structuré, dont la phase de retrait principale suit la droite de saturation avec une pente de 1; la deuxième, d'un sol de même texture mais plus structuré, ce que l'on voit à la phase de retrait principale qui commence près de la saturation (sol limoneux) avec une pente nettement différente de 1; et la troisième, d'un sol argileux structuré en agrégats peu cohérents entre eux, dont la phase de retrait principale est décalée de la droite de saturation par une phase de retrait structurale et possède une pente légèrement supérieure à 1 (structure fine agrégée des sols à halloysite)

⁶ En annexe II *Notices de laboratoire* : Notice d'obtention en laboratoire de la courbe de retrait et des paramètres pédologiques associés.

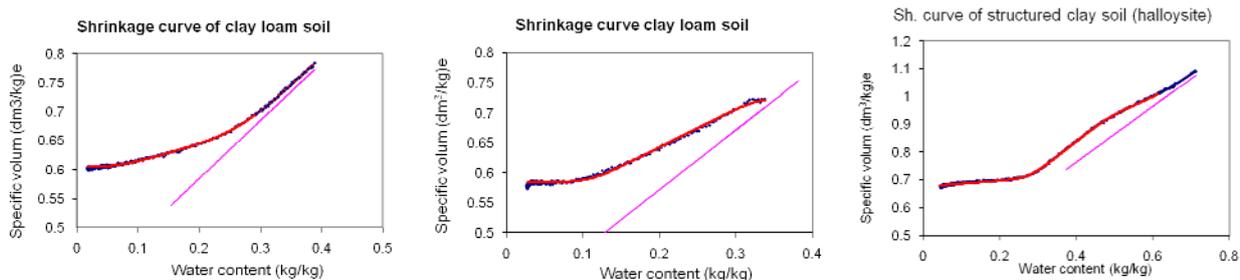


Figure 10. Exemples de courbes de retrait d'échantillons de sol de texture, minéralogie et structure différentes.

La figure 11 montre une feuille « résultats » du software CARHYS écrit sous Excel pour le traitement des courbes de retrait des 7 échantillons d'une même série de mesure. La courbe de retrait est ajustée à la courbe mesurée et l'optimisation de l'ajustement détermine les paramètres de la courbe (Braudeau et al., 2004).



Figure 11. Feuille Excel des résultats de l'analyse rétractométrique d'une série d'échantillons.

Les caractéristiques pédohydriques s'inscrivent automatiquement dans le tableau sous le numéro de l'échantillon et les courbes de retrait modélisées et mesurées correspondantes s'affichent à droite avec la droite de saturation en jaune.

Les résultats et la feuille d'identification des échantillons d'une série sont mis dans le même répertoire qui porte le nom RET + la date de la mise au rétractomètre (exemple RET051222 pour la mesure d'une série commencée le 22/12/2005)

4.2.2 Mesure de la courbe tensiométrique⁷

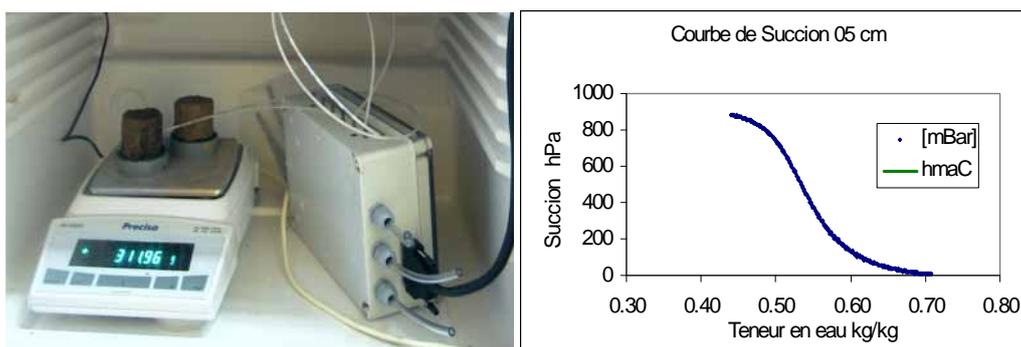


Figure 12. Mesure de la courbe tensiométrique (potentiel de l'eau macroporale, h_{ma})

La mesure de la courbe tensiométrique est effectuée dans une enceinte climatisée à température constante (37°C). La courbe est mesurée en continu à l'aide d'un tensiomètre relié à un capteur de pression et une centrale de saisie. La mesure de la courbe tensiométrique donne accès aux paramètres des courbes de potentiel micro et macroscopique $h_{ma}(W_{ma})$ et $h_{mi}(W_{mi})$ (Braudeau et al. 2007, Annexe A.).

La figure 13 montre le résultat de l'ajustement des 3 courbes tensiométriques correspondant aux courbes de retrait de la figure 11.

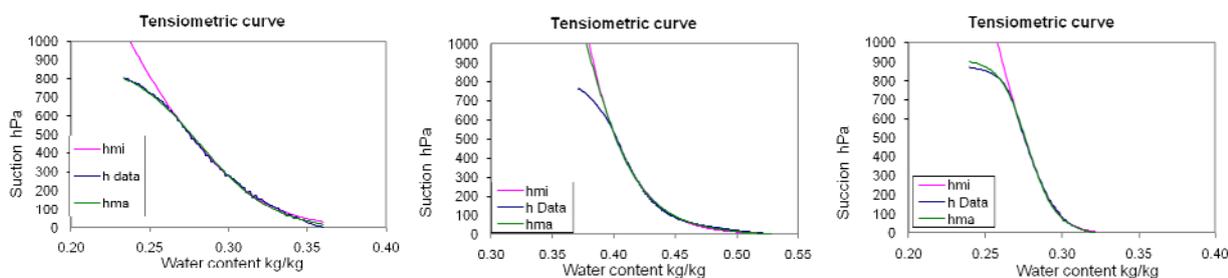


Figure 13. Courbes de potentiel, mesurées et calculées, des échantillons de la figure 11.

La courbe en rouge représente la courbe de potentiel de la microporosité du plasma argileux des peds primaires (h_{mi}).

De même que pour la mesure rétractométrique, un logiciel écrit dans l'environnement Excel a été élaboré pour traiter automatiquement les courbes tensiométriques de façon à en extraire les paramètres hydrostructuraux relatifs à la macroporosité. Dans la notice explicative que l'on trouvera en Annexes, si le protocole de mesure décrit est bien resté le même, la façon d'ajuster la courbe de potentiel à la courbe mesurée a changé de même que le logiciel correspondant. Les nouvelles équations utilisées et la façon de procéder pour obtenir les paramètres micro et macroscopiques à partir de la courbe tensiométriques sont décrites dans l'article de Braudeau et al. (2007) en annexes.

4.2.3 Mesure de la conductivité du sol non saturé

Le dispositif de mesure est un cylindre de prélèvement de sol (5/5 cm), percé de deux trous distants de 1 cm de 2 cm de la surface pour laisser passer les mini tensiomètres à bougie poreuse qui seront fichés dans l'échantillon initialement saturé. Le cylindre de sol, fermé à sa face inférieure et muni des deux tensiomètres, est introduit dans l'enceinte climatisée contenant le même matériel de mesure et saisie que pour la mesure de la courbe de potentiel (Figure 14). L'évaporation de l'eau ne se fait qu'en surface de l'échantillon faisant apparaître peu à peu une différence de potentiel entre les deux tensiomètres qui est mesurée en continu. Connaissant la courbe de potentiel en fonction de la teneur en eau mesurée

⁷ En Annexe II Notices de laboratoire : Notice d'obtention en laboratoire de la courbe tensiométrique et des paramètres pédologiques associés.

précédemment sur l'échantillon, on peut calculer la conductivité en fonction de la teneur en eau macroscopique W_{ma} .

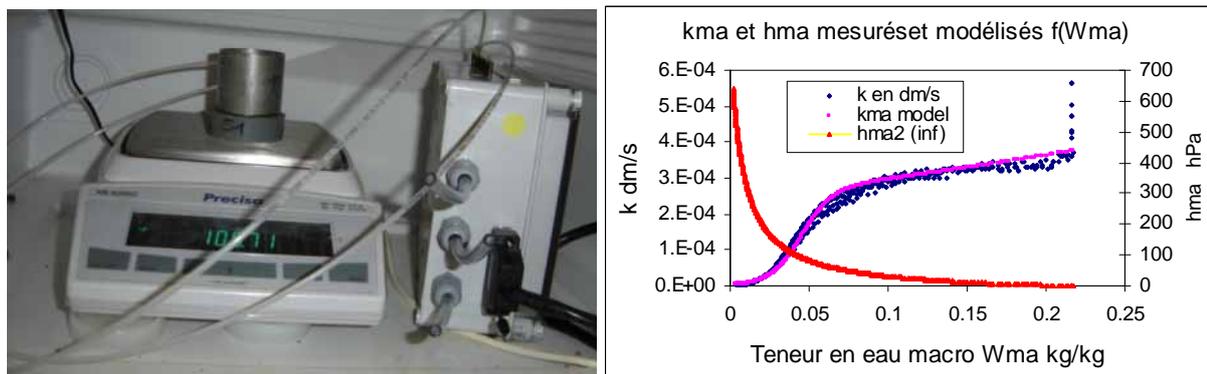


Figure 14. Appareillage de mesure de la conductivité hydraulique. Courbes de conductivité hydraulique mesurée (points bleus) et modélisée (en violet) et courbe de potentiel en rouge.

En s'appuyant sur des expressions exponentielles de la conductivité hydraulique k existantes dans la littérature, Braudeau and al. (2007, Annexe A.) ont proposé d'exprimer la conductivité hydraulique relative à l'eau macroscopique inter-agrégat, k_{ma} , sous la forme d'une équation logistique [1] valable quelque soit la gamme de teneur en eau macroscopique (W_{ma}) de l'échantillon :

$$k_{ma} = \frac{k_{maL} \exp(\alpha_o W_{ma})}{k_{maL}/k_{ma}^o + \exp((\alpha_a - \alpha_L)W_{ma})} \quad [1]$$

Les deux paramètres α_o et k_{ma}^o correspondant à la gamme des faibles teneurs en eau macroscopiques ($h > 100$ kPa) sont déterminés par la mesure en laboratoire ci-dessus (Figure 14) qui s'inspire de la méthode Wind connue.

Les 2 autres paramètres correspondent aux fortes teneurs en eau proches de la saturation ; ils sont déterminés sur le terrain à l'aide de méthodes connues comme celle utilisant l' infiltromètre à disques.

Une notice explicative⁸ des deux mesures, en laboratoire et sur le terrain, est donnée en Annexe ainsi que l'explication des feuilles de calcul correspondantes. Comme pour les deux méthodes de mesure précédentes, les feuilles de traitement des données et de calcul des paramètres ont évoluées ; elles sont décrites dans Braudeau et al. (2007, Annexe A.).

4.3 La base de donnée du SIRS-Sol de Martinique

Cette base de données reprend les observations de terrain, les analyses et les résultats d'analyse faits par l'IRD (Institut pour la Recherche et le Développement) pour la caractérisation des sols martiniquais.

S'articulant autour des différentes tables présentées en Figure 15, la base de donnée est organisée de façon à retrouver facilement les sorties de terrain réalisées, leurs description ainsi que les échantillons prélevés et les analyses correspondantes (rétractométrie, potentiométrie conductimétrie).

⁸ En Annexe C. *Notices de laboratoire* : Notice d'obtention en laboratoire et in situ de la conductivité macroscopique.

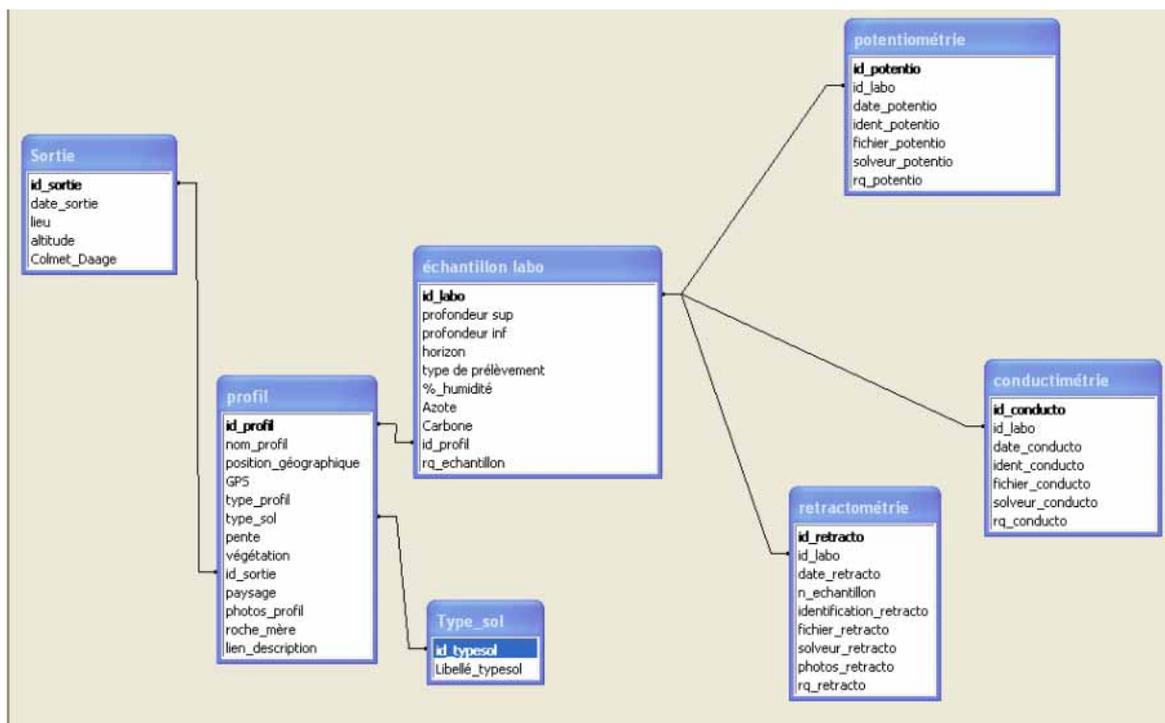


Figure 15: liste des relations entre tables

Les tableaux suivants reprennent les champs définis dans chaque table et les explicitent :

Tableaux 5. Description des champs de la base de données

Table : Sortie		
Nom du champ	Type de données	Description
id_sortie	NuméroAuto	Clé primaire
date_sortie	Date/Heure	date de la sortie
lieu	Texte	Lieu de la sortie
Altitude	Numérique	Altitude du lieu
Colmet_daage	Numérique	Numéro de la carte Colmet Daage correspondante
Localisation	Lien hypertexte	Lien vers une carte IGN au 1/25 000ème de la zone
Table : Profil		
Nom du champ	Type de données	Description
id_profil	NuméroAuto	Clé primaire
nom_profil	Texte	Nom donné au lieu du profil
position_géographique	Texte	localisation du profil. Ex : haut/bas de pente
GPS	Texte	coordonnées GPS du lieu
type_profil	Texte	type d'opération réalisée : fosse ou prélèvement à la tarière
type_sol	Numérique	unité de sol selon Colmet-Daage
pente	Texte	pente du terrain au niveau du profil
végétation	Texte	nature de la végétation à l'emplacement du profil, description de la litière, historique cultural
id_sortie	Numérique	Référencement à la sortie de terrain correspondante
paysage	Texte	description du lieu
photos_profil	Lien hypertexte	lien vers les photos prises lors de la sortie
roche_mère	Texte	Description de la roche mère
lien_description	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel comprenant une description du profil et des photos
Localisation_profil	Lien hypertexte	Lien vers une carte IGN au 1/25 000ème permettant de localiser le site de prélèvement

Table : échantillon_lab		
Nom du champ	Type de données	Description
id_lab	NuméroAuto	Clé primaire
profondeur sup	Numérique	limite supérieure de l'horizon
profondeur inf	Numérique	limite inférieure de l'horizon
horizon	Texte	taxonomie de l'horizon de prélèvement (liste prédéfinie)
type de prélèvement	Texte	en vrac (échantillon remanié) et/ou à l'aide d'un cylindre (échantillon non remanié)
%_humidité	Numérique	% d'humidité mesuré sur échantillon vrac par passage à l'étuve
Azote	Numérique	% d'Azote
Carbone	Numérique	% de Carbone
id_profil	Numérique	Référencement au profil correspondant
rq_echantillon	Texte	remarques sur le prélèvement : nombre éch. etc.

Table : rétractométrie		
Nom du champ	Type de données	Description
id_retracto	NuméroAuto	Clé primaire : référencement automatique de l'analyse
id_lab	NuméroAuto	Numéro de référence de l'horizon analysé
date_retracto	Date/Heure	Date de l'analyse rétractométrique
n_echantillon	Texte	numéro de l'échantillon dans le rétractomètre (liste prédéfinie : A, C, D, E, F, G, H)
identification_retracto	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel d'identification des échantillons analysés en rétractométrie
fichier_retracto	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel donnant la courbe de retrait à partir des valeurs obtenues
solveur_retracto	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel calculant les caractéristiques du sol par modélisation de la courbe de retrait
photos_retracto	Lien hypertexte	Lien vers le dossier de photos des échantillons avant et après analyse
rq_retracto	Texte	Remarques diverses sur l'analyse rétractométrique réalisée

Table : potentiométrie		
Nom du champ	Type de données	Description
id_potentio	NuméroAuto	Clé primaire : référencement automatique de l'analyse
id_lab	NuméroAuto	Numéro de référence de l'horizon analysé
date_potentio	Date/Heure	Date de l'analyse
ident_potentio	Lien hypertexte	Lien vers un fichier bloc note reprenant les caractéristiques principales de l'échantillon et de l'analyse (masses, température, pas de temps etc...)
fichier_potentio	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel reprenant les valeurs de masses et de potentiel et donnant la courbe potentiométrique
solveur_potentio	Lien hypertexte	Lien vers le fichier Excel calculant les caractéristiques du sol par modélisation de la courbe potentiométrique
rq_potentio	Texte	Remarques diverses sur l'analyse réalisée

Table : conductimétrie		
Nom du champ	Type de données	Description
id_conducto	NuméroAuto	Clé primaire : référencement automatique de l'analyse
id_lab	NuméroAuto	Numéro de référence de l'horizon analysé
date_conducto	Date/Heure	Date de l'analyse
ident_conducto	Lien hypertexte	Lien vers un fichier bloc note reprenant les caractéristiques principales de l'échantillon et de l'analyse (masses, température, pas de temps etc...)
fichier_conducto	Lien hypertexte	Lien vers un fichier Excel reprenant les valeurs de masses et de potentiel et donnant la courbe potentiométrique
solveur_conducto	Lien hypertexte	Lien vers le fichier Excel calculant les caractéristiques du sol par modélisation de la courbe potentiométrique

Table auxiliaire permettant de renseigner le type de sol observé à l'aide d'une liste de sol prédéfinie s'appuyant sur la caractérisation de Colmet Daage.

Table : Type_sol		
Nom du champ	Type de données	Description
id_typesol	NuméroAuto	Clé primaire : référencement automatique de l'analyse
Libellé_typesol	Texte	Type de sol (liste prédéfinie)

La base de données dispose d'une page d'accueil qui propose les diverses actions possibles et permet ainsi de rechercher des informations existantes ou de renseigner la base par de nouvelles données:

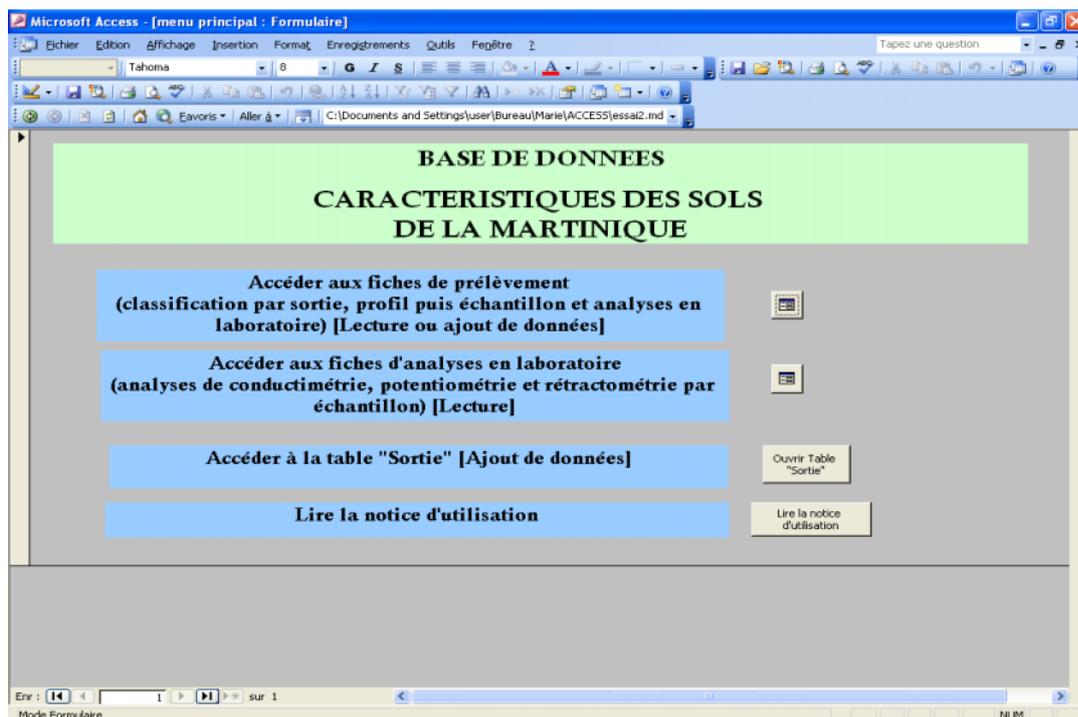


Figure 16. Page d'accueil de la base de données du SIRS-Sols

4.4 Organisation du laboratoire autour du SIRS-Sols

Le schéma Figure 17 ci-dessous présente les différentes activités spécifiques du laboratoire qui sont enregistrées dans le SIRS-Sol. Elles se partagent en trois catégories :

- Les sorties sur le terrain (en rouge), soit pour le prélèvement de sols archétypes et la reconnaissance d'unités primaires, soit pour la caractérisation des sols sous culture, en milieu agronomique (exemple de la prospection de l'Habitation Clément).
- L'enregistrement dans la base de données et la préparation des échantillons pour analyse. Une fois ramenés au laboratoire, les prélèvements et profils sont référencés et rattachés à l'unité de sol dans laquelle ils se trouvent. Leurs descriptions, photos et toutes autres informations concernant l'endroit du prélèvement (l'unité cartographique de sol) sont rentrées dans la base de données du SIRS-Sol, rattachées au prélèvement ou profil. Les analyses courantes : carbone, azote, teneur en eau du prélèvement et densité apparente, sont systématiquement effectuées.

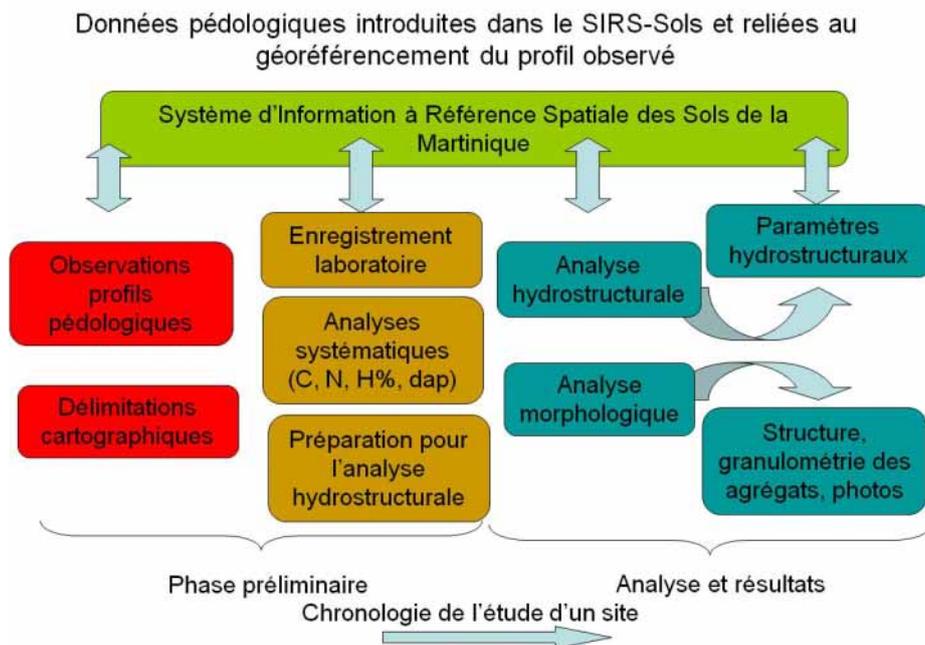


Figure 17. Schéma d'organisation du laboratoire de pédologie IRD au PRAM

- Enfin l'analyse de la structure (fractionnement en agrégats) et des propriétés hydro-structurales (en bleu) des échantillons prélevés. On effectue la mesure des quatre courbes caractéristiques du sol suivie de l'extraction des paramètres de ces courbes à l'aide des feuilles Excel programmées pour cela. Les répertoires de mesure et d'analyse sont reliés au SIRS-Sols selon la description qui en a été faite au paragraphe précédent. Une photo de la série d'échantillons qui passe à l'analyse rétractométrique est prise en début (échantillon saturé) et en fin de la mesure (échantillon sec). Les échantillons de l'analyse rétractométrique sont ensuite conservés dans la pédothèque après séchage à l'étuve à 105° C.

V. ETUDES ET TRAVAUX RELATIFS AU PROJET

5.1 Rapports et Mémoires d'étudiants stagiaires

Nous citons ici les travaux des étudiants qui ont effectué leur stage (minimum 2 mois, maximum 6 mois) dans le cadre du projet en y apportant une large contribution

5.1.1 Spatialisation à différentes échelles fonctionnelles des systèmes sol/végétation à la Martinique : Approche systémique.

Anne-Laure TRANSLER-UNFER

Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Antilles Guyane 2004- 2005

U.F.R-Lettres et Sciences Humaines

Encadrement P. Joseph (UAG) et Erik Braudeau (IRD)

Ce projet de recherche s'articule autour de deux principales disciplines que sont la pédologie et la botanique et auxquelles il faut y insérer l'analyse systémique et l'intégration d'un Système d'Information Géographique. Si la Martinique ne vit son territoire se peupler réellement qu'au XVII^e siècle, les premiers travaux concernant le milieu naturel ne débutèrent qu'un siècle plus tard. Les sols et la végétation quant à eux font l'objet d'une étude récente. On pense effectivement aux travaux pédologiques réalisés par F. Colmet-Daage par exemple ou bien encore aux botanistes tels que J.P Fiard ou O. Portecop qui ont réalisé de nombreuses recherches sur la flore des Antilles. Les travaux antérieurs et l'état de la connaissance concernant ces deux thématiques s'avèrent donc indispensables dans le cadre de ce projet qui a pour but d'approfondir et réactualiser ces travaux. Il sera également question d'insérer ce sujet au sein de diverses écoles de pensées et enfin démontrer l'originalité de ce dernier par le biais de l'approche systémique d'une part et l'intégration d'un SIG d'autre part.

5.1.2 Étude des données de la carte pédologique des sols de la Martinique en vue de son intégration dans un SIRS-Sol

Par Irène MARQUEZ

Mastère Silat, MTD Montpellier Septembre 2005

Avec la collaboration de Maud Cabot (Mastère 1, Toulouse)

Le thème général est la représentation cartographique des unités primaires du sol selon l'approche systémique. Mon travail a consisté, dans un premier temps, à tenter de décrire l'organisation et la délimitation des unités pédologiques telles que Colmet-Daage les a définies dans la carte des sols au 1 :20.000^e à l'aide du logiciel ArcGIS. En raison de la courte durée de mon stage, toute la Martinique ne peut être couverte par ce complément d'analyse physique de la délimitation des sols. Il est en revanche possible d'initier le SIRS-Sol sur une petite zone de la Martinique : le bassin versant de la Capot.

Ce travail devait permettre d'abord d'approfondir la compréhension des limites des différents types de sols présents en Martinique et la connaissance de leurs paramètres de modélisation pédohydrique (SIRS-Sols). Il doit aussi être un outil de gestion des données du laboratoire de pédologie et de diffusion des connaissances scientifiques (base de données).

5.1.3 Incidence à moyen terme de la conduite de bananeraies sur les propriétés du sol ; conséquences sur le fonctionnement hydrique et l'érosion

Par Antoine Hubert

Mémoire de fin d'étude d'ingénieur agronome ENSA Rennes (Sept. 2005)

Encadrement Raphaël Achard (Cirad)

En Martinique, des études ont déjà été menées sur l'impact des systèmes de culture sur le fonctionnement hydrique, le ruissellement et l'érosion sur sols bruns rouille à halloysite :

- sur canne, ananas et banane (parcelle nouvellement plantée et parcelle établie avec paillis de résidus), elles ont montré que les risques en bananeraie et canne étaient moindres que sur ananas et sol nu (Khamsouk, 2001).
- sur bananeraie établie, un système intensif génère un fort ruissellement et une érosion importante (44 T/ha/an de pertes en terre, Achard, *com. pers.*) comparativement à une bananeraie établie avec paillis.

La bananeraie, de part la structure de son peuplement, concentre les pluies incidentes qui sont susceptibles de saturer rapidement la conductivité au pied du bananier et de générer un ruissellement. Le paillis a été décrit en bananeraie comme un facteur important de limitation de l'érosion (Rishirumhirwa, 1993b ; Roose *et al.*, 1999). Cependant, la comparaison entre système intensif et système de type pérenne, en s'affranchissant de cet effet paillis, met en évidence un maintien des différences en terme de lames d'eau ruisselée et de pertes en terre. Une identification des facteurs de conduite de la bananeraie influant sur ces phénomènes permettrait de proposer une amélioration des systèmes intensifs de Martinique.

A partir de l'étude du fonctionnement de ces deux systèmes de culture, on souhaite comprendre les processus pédologiques et agronomiques à l'origine de ces différences. On se concentrera sur la caractérisation physique et hydrique du sol pour tenter d'identifier hors effet paillis les phénomènes impliqués.

5.1.4 Etude pédologique, approche systémique, nouvelle caractérisation des sols et mise en place de la méthodologie associée.

Par François Rabier (Sept 2006)

Master professionnel MISSAO (*Mesure Instrumentation Surveillance Sols Atmosphère Océans*)
Université du Sud Toulon Var, UFR Sciences et Techniques
Encadrement Erik Braudeau (IRD)

Mon stage au sein du laboratoire de pédologie, aura été dans un premier temps de me familiariser aux différentes méthodes de caractérisation hydrostructurale des sols, (Potentiométrie, Rétractométrie, Conductivité), puis de les faire fonctionner afin d'améliorer leur protocole expérimental et ainsi mener à bien les analyses ; ceci afin de mettre en place la méthodologie évoquée pour le SIRS-Sols. J'ai pu élaborer les notices détaillées présentant ces manipulations, la méthode permettant la mise en forme des données, et la résolution des éventuels problèmes rencontrés lors de l'analyse.

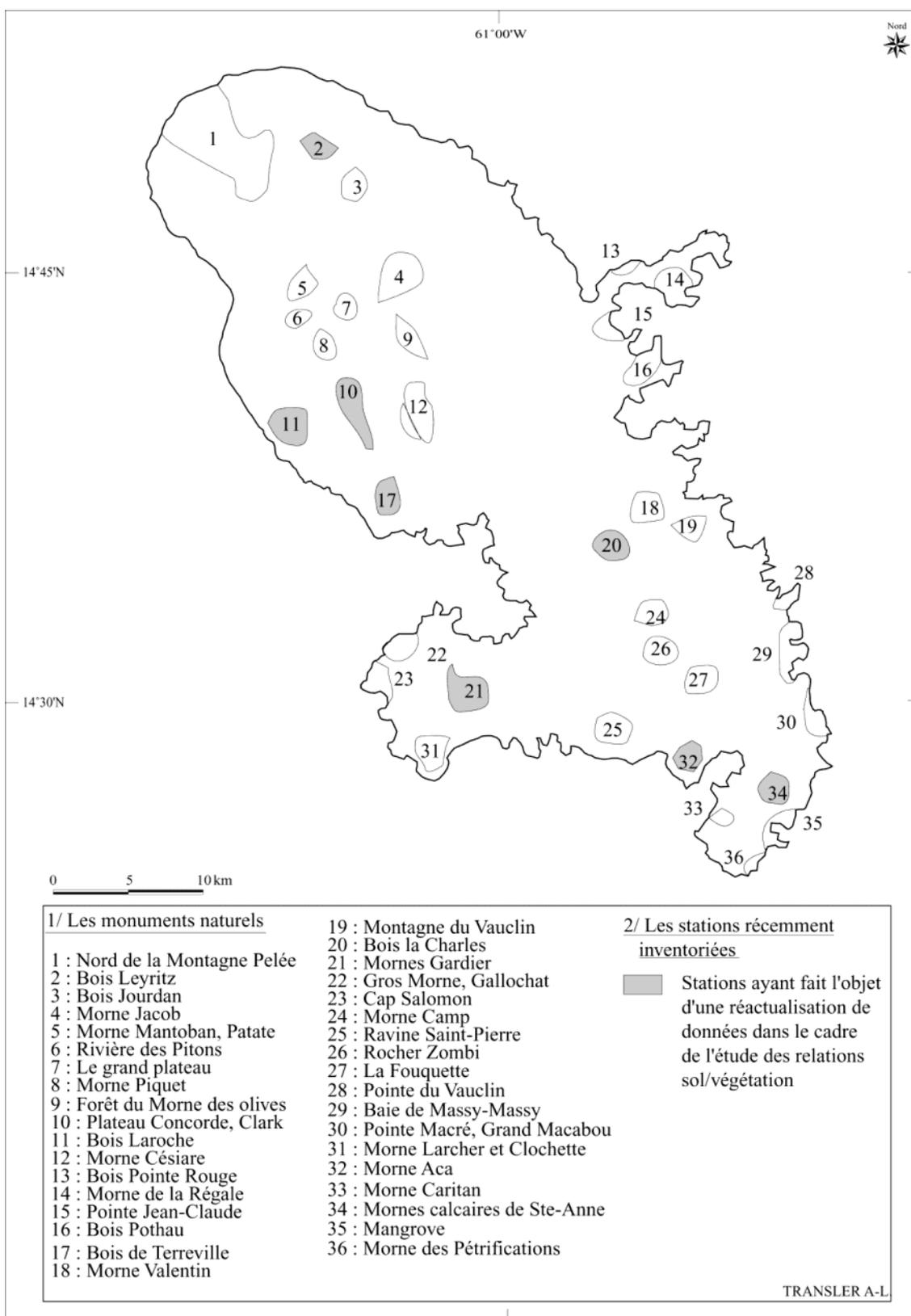
5.2 Travaux d'application engagés par le laboratoire

5.2.1 Description et caractérisation des sols et du couvert forestier dans leurs conditions naturelles en sites protégés dits *Monuments naturels*

Par P. Joseph, E. Braudeau, A-L. Transler-Unfer, L. Rangon, D. Adèle, N. El Ghezal, G. Bompas

De nombreuses sorties de terrain ont été organisées pour décrire conjointement les sols et le couvert forestier de stations botaniques préservées en milieu naturel. Les stations étudiées correspondent à des milieux particuliers dits « monuments naturels » répertoriés la figure 18. Ces stations ont déjà fait l'objet de relevés botaniques (P. Joseph, in *Les Antilles, terres à risques*, 1999) et l'intérêt de reproduire ces inventaires demeure dans la réactualisation des données botaniques en même temps que de la caractérisation fonctionnelle (hydrostructurale) des sols associés. En effet, ceux-ci peuvent être qualifiés de sols archétypes car fonctionnant et ayant évolué en conditions naturelles. Leur description et caractérisation hydrostructurale constitue bien une référence typologique des sols de la Martinique à introduire prioritairement dans le SIRS-Sols ; il sera loisible ensuite de comparer ces sols et leur évolution avec les sols cultivés. Rappelons aussi que les deux types de relevés sont réalisés sur la même station dans le but d'y analyser leurs relations et aboutir à une meilleure définition du bioclimat à la surface du sol et des unités primaires de sol correspondantes.

L'excellent mémoire de DEA de Anne Laure mentionné plus haut explicite la méthodologie adoptée et donne quelques exemples de stations étudiées. Les différents relevés, descriptions et caractérisations de laboratoire, ont été archivés dans la base de données du SIRS-Sols et restent maintenant à être exploités.



Sources : JOSEPH P., Les monuments naturels : objets opératoires dans l'aménagement de l'écosystème Martinique » in *Les Antilles, terres à risques*, 1999.

5.2.2 Prospection et caractérisation pédologique de l'habitation Clément

Par E. Braudeau, A. Charlier de Chily, L. Rangon, M. Crayol, F. Rabier (Avril 2006)

Le laboratoire de Pédologie IRD du PRAM a proposé de réaliser une étude pédologique des sols de l'Habitation Clément qui projette d'installer un système d'irrigation automatisé, tenant compte, dans la mesure du possible, du type de sol et sa capacité de rétention en eau, ainsi que des apports hydriques naturels et de l'ensoleillement. Outre l'intérêt pour l'Habitation, cette étude pédologique permettrait au laboratoire de pédologie du PRAM de réaliser des caractérisations physiques des sols de cette zone, dans le cadre de son projet SIRS-Sols.

5.2.3 Simulation du comportement hydrique du profil pédologique de la fosse B de Ponterre Rivière Lézarde

Par Marie Crayol, Antoine Hubert, Luc Rangon, R. Achard (Juillet 2006)

Compte rendu d'un essai de simulation par le modèle Kamel^X de l'infiltration de l'eau sous irrigation puis du drainage, d'un sol à halloysite dans une parcelle d'essai de Rivière Lézarde. Le profil de sol avait été décrit et caractérisé en détail par A. Hubert dans un travail précédent.

Les données de terrain, la caractérisation et le suivi ont été rassemblées dans le rapport et les premières simulations ont été faites. Ce travail a permis d'améliorer le modèle Kamel^X utilisé à l'époque et contribué à produire la version actuelle, *KamelV72.sm*. Cette nouvelle version a été mise au point en 2007 et est celle à laquelle fait référence l'article « *Soil water - soil structure interactions: new concepts and their modeling* » (Braudeau et al. 2007) reproduit en Annexes.

5.2.4 Etude au laboratoire de l'absorption-désorption de la molécule de chlordécone dans le sol, par type de sol.

A. Soler (Cirad), Agnes de Charlier de Chily (IRD) et Erik Braudeau (IRD)

Le Cirad au PRAM possède une instrumentation d'analyse très sensible (analyses par CPG :ECD ou HPLC) qui lui permet de doser certaines molécules de pesticides comme le chlordécone dans les eaux d'élution du sol. Suite à la l'installation des mesures de caractérisation hydrostructurale du sol au laboratoire de Pédologie, on a voulu initier dans le cadre du projet l'étude de l'absorption-désorption de la molécule de chlordécone **par type de sol** (c'est à dire en fonction de ses propriétés hydrostructurales) par la mise en place d'expérimentations, très simples, sur petites colonnes de sol. Tous les paramètres de modélisation du comportement hydrostructural de l'échantillon de sol auront été mesurés préalablement, ce qui devait permettre la caractérisation et modélisation physique de l'absorption et désorption de la molécule de Chlordécone des espaces poreux internes et externes aux agrégats primaires du sol, et par type de sol. Cette modélisation, confrontée à la mesure du Chlordécone dans les eaux d'élution des colonnes de sol soumises à des historiques d'humectation - dessiccation différents, devait conduire à la détermination des paramètres caractéristiques du sol de l'absorption-désorption de la molécule de chlordécone.

Les mises au point respectives de la méthodologie envisagée : mesure de la dynamique de gonflement des agrégats de sol (4^{ème} courbe caractéristique de la pédostructure) au laboratoire de pédologie ; et dosage de la molécule de chlordécone au laboratoire de biochimie, ont été engagées. Le rapport de stage de Mlle Nadine Fitte Duval (Master 1, Toulouse) en fait état, donnant les premiers résultats de mesures effectuées sur le sol à halloysite de Rivière Lézarde. Cependant, Il n'a pas été possible dans le temps du programme d'étudier d'autres sols et d'approfondir cette opération. Les acquis du programme SIRS-Sol ouvrent des possibilités nouvelles pour appréhender le comportement et le devenir de cette molécule dans les sols. Il appartiendra donc aux nouveaux projets de développer ces approches.

VI. CONCLUSION

6.1 Rôle et fonction du laboratoire au sein du PRAM

Un SIRS-Sols (Système d'Information à Référence Spatiale des Sols) a été créé spécifiquement pour un laboratoire de pédologie, lui permettant de remplir une fonction devenue nécessaire pour un organisme de recherche agro-environnementale comme le PRAM : recueillir et conserver les informations naturalistes des pédologues et fournir l'interface nécessaire à leur prise en compte quantitative dans les modèles et concepts agronomiques et environnementaux.

Ainsi, la méthodologie de caractérisation des sols du laboratoire associée au SIRS-Sols lui confère 3 domaines de compétence au sein du PRAM :

1°) *La gestion du SIRS-Sols de la Martinique* : son enrichissement progressif et son utilisation comme fournisseur de données pédologiques fiables et utilisables dans les modèles de simulation agronomique.

2°) *La caractérisation hydrostructurale des sols* qui permet de définir une typologie comparative de leurs propriétés physiques en tant que milieu d'accueil des processus biologiques et biochimiques. On pourra comparer ainsi, autrement que par des corrélations statistiques, les résultats ou l'impact des travaux agricoles effectués sur des sols géographiquement distants et soumis à des conditions climatiques différentes.

3°) *La mise en place d'expérimentations en laboratoire pour l'étude des processus dans le sol*. Disposant des moyens de caractérisation hydrostructurale des sols décrits ici et du modèle Kamel^X, on possède un moyen d'investigation unique pour la recherche des mécanismes d'interactions entre l'activité biologique et le fonctionnement hydrostructural du sol. On a vu en effet que le modèle Kamel^X apportait deux possibilités importantes dans le domaine de la recherche agro-environnementale:

- Il permet le **paramétrage des conditions pédoclimatiques** du sol dans une expérimentation de laboratoire montée à l'image d'un couplage mécaniste de modèles pour étudier par exemple le transport et l'absorption des pesticides dans le sol.
- Il effectue le **transfert d'échelle**, du processus local dans le sol, étudié et caractérisé en laboratoire, à sa perception macroscopique externe à l'échelle de l'unité primaire de sol.

Le laboratoire peut donc s'investir, aussi bien dans **i) la recherche pluridisciplinaire sur les processus dans le sol** (activité biologique, dynamique des pesticides ...) que dans **ii) la modélisation spatialisée des propriétés de production ou stockage du sol** (gaz à effet de serre) et **iii) la constitution des bases de donnée qui archivent ces résultats** si l'on veut conserver la relation avec le type de sol.

6.2 Avancées scientifiques notables

Le projet SIRS-Sols de la Martinique a été le lieu et l'opportunité de réaliser de grandes avancées dans une discipline quelque peu oubliée aujourd'hui, la Pédologie, notamment dans les domaines de la caractérisation physique et typologique du sol, ainsi que de la cartographie et modélisation hydrostructurale des unités primaires de sol.

Ceci n'a pu se produire que grâce à l'application de l'Approche Systémique à la Pédologie qui nous a conduits aux nouvelles notions de SIRS-Sols, pédostructure, peds primaires, etc. lesquelles ont permis de **rendre compatibles la description et cartographie morphogénétique de l'organisation des sols avec la description et modélisation physique de ces organisations**.

De grands progrès ont été réalisés dans la prise en compte de l'organisation interne du sol, la structure du sol, dans les équations physiques de son interaction avec l'eau, jusqu'à être en mesure de formuler une nouvelle physique du sol. Celle-ci entraîne à son tour la constitution d'un nouveau paradigme pour traiter de la structure du sol et de son interaction avec l'eau. **Les modèles informatiques KamelX et KamelSoilX, respectivement de simulation et de caractérisation des propriétés hydro-structurales du sol, sont le fruit de ce nouveau paradigme de la physique du sol.**

En retour de cet apport productif de l'approche systémique à la pédologie, l'expérience du pédologue confronté aux devoirs de synthèse d'une information qualitative, aux problèmes d'échelles spatiale et temporelle, de classification typologique, de description de la structure du sol, etc., a beaucoup aidé à préciser les notions de base de l'Approche Systémique et plus particulièrement le modèle du Système Général proposé par Le Moigne. **Nous avons pu définir ce qu'est l'approche systémique pour les disciplines dont l'objet d'étude est le milieu naturel ou anthropique et pour lesquelles le sol se trouve être le référent spatial organisé.**

6.3 Recommandations

Nous pensons avoir défini et mis en place la méthodologie adéquate à adopter en Pédologie mais aussi dans les disciplines connexes, pour se conformer à l'approche systémique et permettre ainsi d'établir un cadre de recherche pluridisciplinaire cohérent pour les études sur le monde naturel et anthropique (de gestion par l'homme). Le SIRS-Sols, ses outils de caractérisation et de modélisation (KamelX, KamelSoilX) ont tout entiers été construits dans le cadre de l'Approche Systémique, pour cette ouverture pluridisciplinaire; c'est-à-dire *ouverture aux couplages non empiriques entre disciplines dont l'objet d'étude tourne autour du sol.*

L'approche conceptuelle développée dans ce programme et fondée sur une vision systémique des disciplines en relation avec le fonctionnement et les services écosystémiques des sols, nous semble propice à une nouvelle prise en compte de la pédologie comme science de l'organisation du sol. Une telle démarche nous paraît être ciblée tant vers les acteurs et les utilisateurs des résultats de la recherche que vers les enseignants des Universités pour orienter la formation des étudiants en Pédologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluid in porous media*. American Elsevier, New York. 764 pp.
- Braudeau, E., C. Zidi, A. Loukil, C. Derouiche, D. Decluseau, M. Hachicha, and A. Mtimet. 2001. Un système d'information pédologique, le SIRS-Sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj-Touil. (Basse Vallée de la Majerda). Bulletin Sols de Tunisie, numéro spécial 2001. Direction des sols (Edn.), Tunis: 134p.
- Braudeau, E., Costantini, J.M., Bellier, G. and Colleuille, H., 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 525-535.
- Braudeau, E. and Mohtar, R.H., 2004. Water potential in non rigid unsaturated soil-water medium. Water Resources Research 40, W05108.
- Braudeau, E., Frangi, J.P. and Mohtar, R.H., 2004a. Characterizing non-rigid dual porosity structured soil medium using its Shrinkage Curve. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 359-370.
- Braudeau, E., Mohtar, R. and Chahinian, N., 2004b. Estimating soil shrinkage parameters. In: Y. Pachepsky and W. Rawls (Eds.), *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Elsevier, Amsterdam. pp. 225-240.
- Braudeau, E., Sene, M. and Mohtar, R. H., 2005. Hydrostructural characteristics of two African tropical soils. Eur. J. Soil Sci. 56, 375–388.
- Braudeau, E. and Mohtar, R. H., 2006. Modeling the Swelling Curve for Packed Soil Aggregates Using the Pedostructure Concept. Soil Sci. Soc. Am. J. 70, 494–502.
- Braudeau, E., Joseph, P., 2005. Les principes de l'approche systémique appliqués à la pédologie physique et à la géobotanique pour aborder le couplage des systèmes sols et couvert végétal. Communication en séance plénière au Colloque « Les écosystèmes forestiers des Caraïbes - De la connaissance fondamentale à la gestion durable », 5-10 Décembre 2005, La Martinique.
- Braudeau, E. and Mohtar, R. H., 2007. Modeling the Soil System: Bridging the Gap Between Pedology and Soil-Water Physics. Global and Planetary Change Journal (accepted)
- Braudeau, E., Mohtar, R. H., El Ghezal, N., Crayol, M., Clouvel, P., Jallas, E. and Martin, P., 2007. Soil water - soil structure interactions: new concepts and their modelling. Eur. J. Soil Sci. (submitted).
- Colmet-Daage F., 1969, Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20.000. ORSTOM Antilles.
- Joseph, P., 1997, Dynamique, écophysologie végétales en bioclimat sec à la Martinique, Thèse de doctorat nouveau régime, Université des Antilles et de la Guyane, 941 p., annexes, 111 p.
- Joseph P., 2004, Les aires protégées terrestres de la Martinique : véritables laboratoires pour l'étude de la dynamique végétale, *Revue Ecologie (Terre Vie)*, Paris vol.59, pp. 27-36.
- Le Moigne, J. L. 1994. *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*. (4ième édition) Collection Systèmes-Décisions, Presses Universitaires de France.
- Muxart T., Blandin P. et Friedberg C., 1992. In *Sciences de la Nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontière*. CNRS Editions 1992. Pages 403-425.
- Transler-Unfer, A-L., 2005. Spatialisation à différentes échelles fonctionnelles des systèmes sol/végétation à la Martinique : Approche systémique. DEA, Université Antilles Guyane, Martinique

Kachanoski, R. G., 1988, Processes in Soils-from Pedon to Landscape. in *Scales and Global Change - spatial and temporal variability in biospheric and geospheric processes*. SCOPE 35, T. ROSSWALL, P. G. RISSER, R. G. WOODMANSEE Eds; Scientific Committee On Problems of the Environment (SCOPE).