

n°6 · Décembre 2006

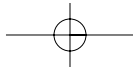
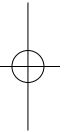
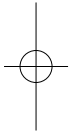
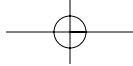
Les Cahiers du

PRAM

Pôle de Recherche Agro-environnementale
de la Martinique

L'AGRO-ENVIRONNEMENT, Une science à toutes les échelles



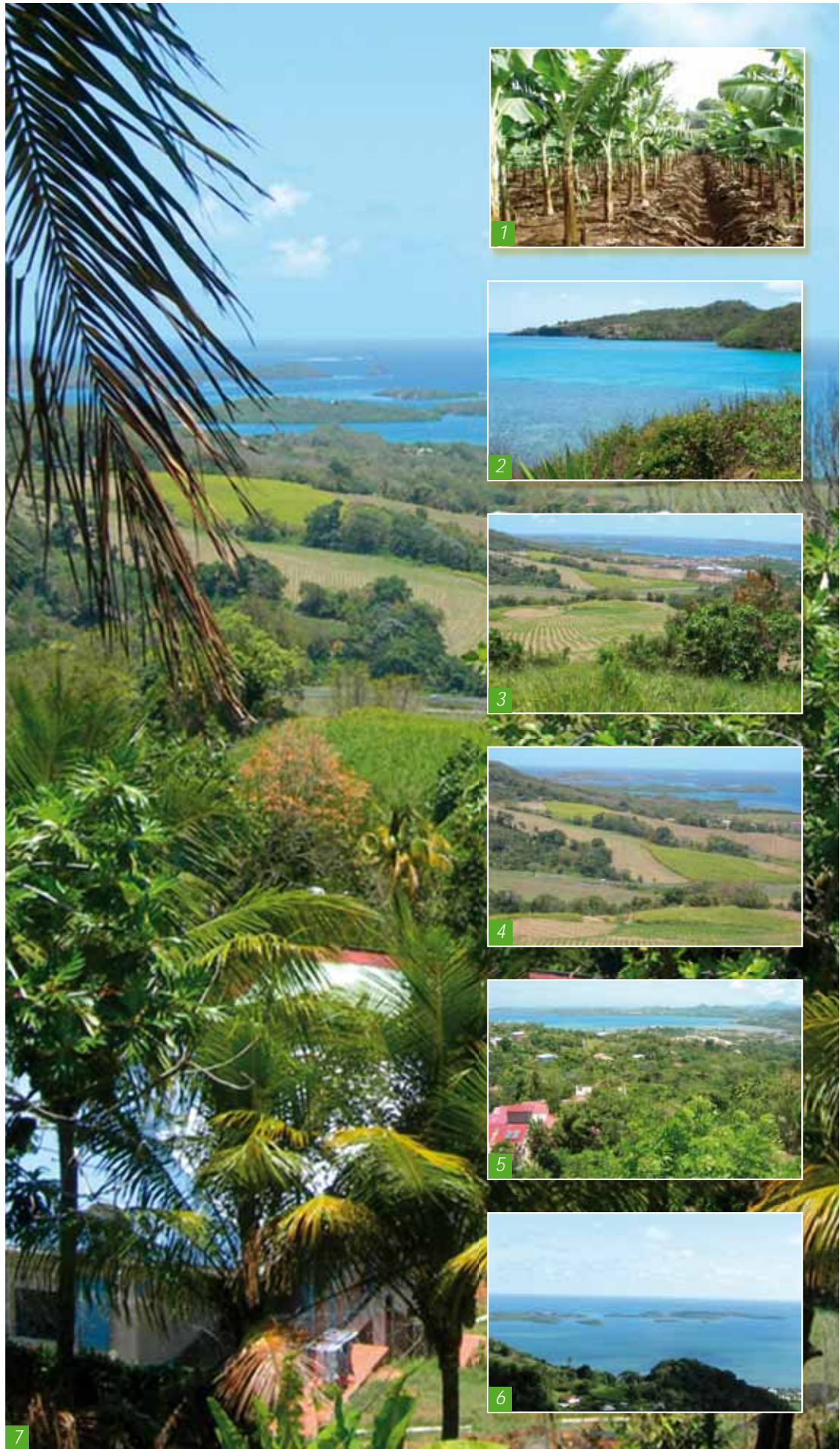




SOMMAIRE

EDITO	5
SIGLES ET ABRÉVIATIONS UTILISÉS	6
1 PROPRIÉTÉS FRACTALES DES ANDOSOLS DE LA MARTINIQUE : RELATION ENTRE LA STRUCTURE DU SOL A L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE ET LEUR POUVOIR DE FIXATION DU CARBONE	7
● T. WOIGNIER, J. PRIMERA, L. RANGON, P. DIEUDONNÉ	
2 NOUVELLE MÉTHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES SOLS	11
● E. BRAUDEAU, N. EL GHEZAL, M. CRAYOL, L. RANGON	
3 VARIABILITÉ DE LA TENEUR DES SOLS EN CHLORDÉCONE : CONSÉQUENCES POUR L'ÉCHANTILLONNAGE ET ÉTUDE DE LA CONTAMINATION DES PLANTES	17
● R. ACHARD, Y.M., CABIDOCHÉ, A. CARON, A. CHARLIER DE CHILY, M. LESUEUR-JANNOYER	
4 LA CRÉATION DE NOUVELLES VARIÉTÉS DE BANANES : UN DÉFI ENVIRONNEMENTAL	23
● F. SALMON	
5 DÉVELOPPER DE NOUVEAUX OUTILS POUR LES PROBLÉMATIQUES AGRO-ENVIRONNEMENTALES	31
● P. TIXIER, P. MARIE, M. HOUDART	
6 ÉVALUATION ASSISTÉE PAR MODÈLE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE : EXEMPLE DES SYSTÈMES DE CULTURE À BASE DE BANANIERS	33
● P. TIXIER	
7 ÉVALUER LES RISQUES AGRO-ENVIRONNEMENTAUX À L'ÉCHELLE DES TERRITOIRES : DIAGNOSTIC DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS AGRICOLES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA BAIE DU ROBERT	37
● P. MARIE	
8 RENDRE COMPTE DES IMPACTS DE L'ENVIRONNEMENT SUR L'AGRICULTURE : LES APPORTS DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS	43
● M. HOUDART	
9 QUELQUES FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE 2006 AU PRAM	47

*1 : parcelle de bananes
2 à 7 : différentes vues
de la Baie du Robert.*





EDITO

Le 6^e numéro des *cahiers du PRAM* aborde la question du “changement d’échelle” - où l’on passe du “plus petit au plus grand”, mais aussi “du plus petit au encore plus petit”, comme l’illustrent les différents articles. La sortie de ce cahier coïncide avec l’évolution du PRAM : le “Pôle de Recherche Agronomique de la Martinique” est devenu le “Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique”.

Il s’agit bien, là aussi, d’un “changement d’échelle” puisque la sphère d’investigation s’élargit de l’agronomie à l’“agro-environnement”. Ce n’est pas un “effet de mode”, mais ce choix du champ de recherche de l’agro-environnement, fédérant plusieurs disciplines (agronomie, écologie, hydrologie, géographie, économie ou encore sociologie), nous paraît le plus adéquat pour répondre aux questionnements sur la connaissance et la gestion des écosystèmes insulaires tropicaux, objet même du PRAM, au service d’un développement rural durable de l’île et de la Caraïbe, ayant à cœur de venir en appui aux demandes et besoins locaux, et de fournir des outils d’aide à la décision.

En effet, les problématiques agro-environnementales, privilégient une approche systémique, considérant que le fonctionnement de tout système complexe est basé sur l’existence de phénomènes biophysiques, mais également d’agents, de relations entre ces agents, de niveaux hiérarchiques interdépendants et de réseaux, ainsi que de comportements dynamiques et évolutifs.

Par conséquent, chaque discipline est amenée à prendre en compte les modèles théoriques des autres disciplines, parfois ses méthodes et ses outils, et dans tous les cas, les apports de connaissances. Se pose alors la question de l’intégration de ces différentes informations, de ces différents niveaux d’organisation, ainsi que l’abordent, chacun dans leur spécialité, les articles de ce numéro des cahiers du PRAM.

Par exemple, les propriétés du sol, étudiées à une échelle “nanométrique”, révèlent de nouvelles potentialités ; l’évaluation du risque environnemental nécessite de passer de l’échelle de la parcelle à celle du bassin versant ; l’appropriation de nouvelles variétés implique de transformer l’essai en parcelle expérimentale en une production au champ en “vraie grandeur”...

L’intérêt que porte la communauté scientifique à la question du changement d’échelle n’est pas nouveau. En effet, son importance avait été mise en évidence il y a déjà quatre décennies par les chercheurs concernés par l’organisation des activités humaines et les processus physiques.

Cette question du changement d’échelle a pris une dimension nouvelle récemment, notamment pour les raisons suivantes :

- c’est une notion incontournable pour analyser la question de l’organisation hiérarchique du monde,
- les problèmes environnementaux ne peuvent être compris à une seule échelle d’espace,
- les outils d’analyse spatiale développés ces dernières années ont favorisé l’émergence de cette problématique.

Par conséquent, les équipes du PRAM situent aujourd’hui leurs travaux dans une approche territoriale plus adaptée où se pose la question des niveaux d’étude et d’organisation pertinents pour la coordination des politiques, des actions en relation avec la minimisation de l’impact des activités agricoles sur l’environnement.

Le Comité exécutif du PRAM
Anne RIZAND (Cemagref)
Thierry GOGUEY (Cirad)
Marc MORELL (IRD)

Sigles et abréviations utilisés

BRGM	• Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CNRS	• Centre National de la Recherche Scientifique
DAF	• Direction de l'Agriculture et de la Forêt
GES	• Gaz à Effet de Serre
IFREMER	• Institut Français de Recherche et d'Exploitation de la Mer
INRA	• Institut National de la Recherche Agronomique
MEDD	• Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
MOM	• Ministère de l'Outre-Mer
SAU	• Surface Agricole Utile
SIG	• Système d'Information Géographique
SIRS-Sols	• Système d'Information à Référence Spatiale des Sols
SMA	• Système Multi-Agents
SRPV	• Service Régional de la Protection des Végétaux
UAG	• Université des Antilles et de la Guyane
UMR	• Unité Mixte de Recherche



Woignier T.
PRAM / IRD
CNRS Montpellier,

Primera J.
Universidad del Zulia,
Maracaibo, Venezuela,

Rangon L.
PRAM / IRD ,

Dieudonné P.
CNRS Montpellier.

Figure 1 : C% (losanges) et N% (carrés) en fonction de la concentration en allophane des horizons A.

Propriétés fractales des andosols de la Martinique : relation entre la structure du sol à l'échelle nanométrique et leur pouvoir de fixation du carbone

À l'échelle mondiale, les préoccupations sur le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3), conduisent à s'intéresser au rôle des sols en terme de source ou de puits de carbone. En effet, les sols constituent un réservoir superficiel de carbone équivalent à trois fois la quantité stockée dans la biomasse terrestre, et deux fois celle présente dans l'atmosphère.

Il est donc nécessaire de comprendre et de corréler les données concernant des paramètres aussi importants que la minéralogie, la structure du sol, les caractéristiques texturales et physico-chimiques... sur le stockage du carbone, dans l'optique de préserver, voire d'augmenter, les quantités de carbone "séquestré" et, au final, de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Les andosols sont des sols qu'on retrouve essentiellement sur des projections volcaniques (Wada, 1985). Ils sont aussi appelés "sols à allophanes" car ils contiennent toujours une forte proportion de ces minéraux. Les allophanes proviennent de l'altération des roches volcaniques (Quentin *et al*, 1991). Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de ces sols sont très particulières (on n'y distingue pratiquement aucune argile cristalline) et parmi les propriétés de ces sols, il en est une d'une importance capitale : les sols à allophane présentent une capacité exceptionnelle de fixation du carbone et de l'azote apporté par les plantes (Boudot *et al*, 1986).

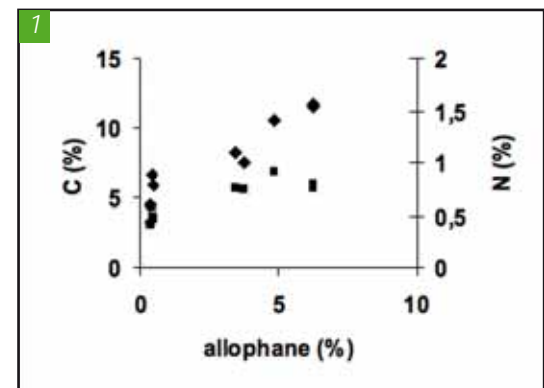
Nous sommes peu documentés sur les mécanismes de séquestration du carbone dans les sols. La connaissance de la structure de ces sols à allophane et la comparaison avec d'autres types de sols (à argile halloysite ou kaolinite) devraient nous aider à comprendre et mieux hiérarchiser les facteurs du milieu à prendre en compte dans la problématique générale de la fixation du carbone dans les sols.

La caractérisation physique de ces solides poreux, en termes de volume poreux, taille de pores, surface interne des pores, ainsi que l'étude de la structure de ces systèmes constituent donc un objectif primordial. Nous allons

mettre en évidence la structure fractale des agrégats d'allophane à l'échelle du nanomètre, et discuterons alors de l'influence de ce type de structure multi-échelle sur la perméabilité des agrégats d'allophane et, partant, de leur aptitude à piéger des espèces chimiques (carbone, mais peut-être aussi la chlordécone).

RELATION ENTRE LA CONCENTRATION EN ALLOPHANE ET LA FIXATION DU CARBONE

La figure 1 montre l'évolution de la concentration en carbone en fonction de la teneur en allophane pour le type d'horizon considéré A (on observe un résultat identique pour des hori-



zons B). Les données confirment que les sols fortement allophaniques contiennent plus de carbone que les sols non allophaniques, et que cette concentration en carbone croît lorsque la teneur en allophane est plus importante. On mesure une évolution d'un facteur 3, en accord avec les résultats annoncés dans la littérature [Wada, 1985 ; Boudot *et al*, 1986 ; Feller *et al*, 1997]).

La compréhension du mécanisme de "séquestration" du carbone dans ces différents sols nécessite une meilleure connaissance de leur structure en agrégats et des propriétés physiques de celle-ci.

La surface poreuse importante mesurée sur les andosols est l'indication d'une forte microporosité (Woignier, 2005). S'il existe dans ces sols des agrégats microporeux, la perméabilité de ces agrégats sera faible et l'accessibilité (de l'oxygène, par exemple) à l'intérieur de ces agrégats

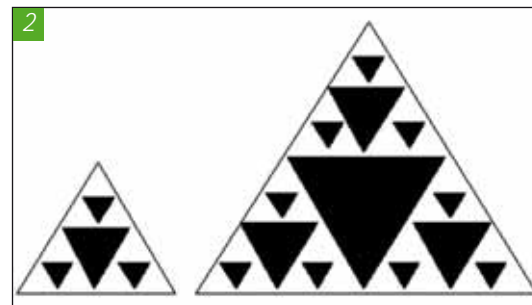
sera difficile. Cela aura comme conséquence de ralentir et limiter la transformation du carbone en CO₂ et, par conséquent, de préserver le carbone présent dans ces agrégats microporeux. Pour vérifier ces hypothèses, une étude de la structure fine des agrégats s'impose.

Les études par microscopie électronique permettent de mettre en évidence les caractéristiques de la phase solide et de la phase poreuse, de l'échelle du nanomètre jusqu'au micromètre. Cette échelle est précisément celle qui correspond à la taille des particules d'allophane (3-4 nm) (Wada, 1985) et des agrégats formés par celles-ci. La description de la structure des agrégats grâce à l'utilisation de la géométrie fractale nous permettra d'apporter un éclairage nouveau.

STRUCTURE FRACTALE DES AGRÉGATS D'ALLOPHANE

La notion de géométrie fractale, introduite par Mandelbrot, permet de caractériser des objets présentant des irrégularités à toutes les échelles (Mandelbrot, 1982).

Les objets fractals sont auto-similaires, c'est-à-dire qu'ils restent semblables à eux-mêmes lors d'un changement d'échelle. Ainsi, si le pouvoir de résolution augmente lors de l'observation d'un tel objet, on obtient une image semblable de ce dernier. La figure 2 en donne une illustration. La notion de dimension dans ces objets

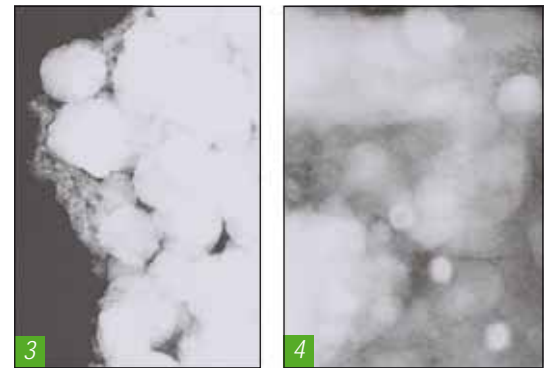


n'est plus définie de façon classique. La dimension se définit de la manière suivante : pour un objet fractal, on calcule la masse M de la structure incluse dans un volume de rayon l et on montre que cette masse suit une « loi d'échelle » : la masse est proportionnelle au rayon à la puissance D_f ; *EMBED Equation.2* où D_f est une valeur non entière. D_f caractérise l'irrégularité de la distribution en masse de la structure. Si on divise la masse par le volume, on obtient classiquement la densité : ainsi la densité ρ varie également avec l'échelle l , suivant la loi *EMBED Equation.2*.

Dans la nature, les objets fractals sont parfois issus de processus d'agrégation de type

aléatoire, et ils ne sont ni de taille infinie, ni formés d'unités infiniment petites. C'est pourquoi la structure fractale est définie entre deux limites : la taille des particules primaires constituant le réseau et la taille maximale des agrégats formés par l'agrégation des particules primaires. La géométrie fractale est intéressante pour décrire les structures poreuses, car elle apporte des renseignements sur la distribution de la masse dans le réseau. Ainsi, on relie la dimension fractale (D_f) à la complexité de l'organisation des agrégats.

Les figures 3 et 4 montrent des clichés de micro-



600 nm

150 nm

scopie électronique à transmission, obtenus sur des échantillons d'andosols contenant une forte proportion d'allophane. Ces photos se rapportent au même échantillon à deux échelles différentes : sur la figure 3, la largeur totale du cliché correspond à une longueur de 600 nm, sur la figure 4, la largeur est équivalente à 150 nm. Il y a une autosimilarité entre les deux clichés et on peut remarquer sur la figure 4 les petites particules d'allophane de taille inférieure à 5 nm qui s'agrègent pour former des objets plus gros, pouvant aller jusqu'à une centaine de nanomètres. Grâce à des techniques de diffusion centrale de Rayons X, nous avons pu déterminer les caractéristiques fractales des agrégats d'allophane : taille des particules primaires = 3-5 nm, taille maximale des agrégats = 50-100nm, $D = 2,8$. Quel est l'intérêt de ces grandeurs et comment vont-elles nous aider à comprendre les causes de l'aptitude des andosols à mieux conserver le carbone dans sa structure ?

PERMÉABILITÉ DES AGRÉGATS FRACTALS D'ALLOPHANE

Nous avons mis en évidence plus haut que la concentration en carbone (C) et en azote (N) dans les échantillons d'andosols croît avec la concentration en allophane. Dans la littérature, il a été montré par analyse au C₁₄, que la concen-

Figure 2 : structure autosimilaire vue à deux grossissements différents.

Figure 3 : microscopie électronique à transmission de l'échantillon contenant 26% en poids d'allophane. La largeur de lamicrographie équivaut à 600 nm.

Figure 4 : microscopie électronique à transmission de l'échantillon contenant 26% en poids d'allophane. La largeur de la micrographie équivaut à 150 nm.



1

tration en C « ancien » est également plus importante dans les sols riches en allophane (Basile-Doelsch *et al*, 2005). On peut donc former l'hypothèse que la présence des agrégats d'allophane ralentit la minéralisation du carbone, c'est-à-dire leur transformation en espèce gazeuse. La minéralisation nécessite le transport d'espèces chimiques (par exemple O_2) qui vont pouvoir réagir avec le carbone présent dans les sols. La plus faible quantité de carbone minéralisé pourrait s'expliquer par la difficulté qu'éprouveraient les espèces chimiques à diffuser à travers certaines zones du réseau poreux (les agrégats fractals), à cause de la faible perméabilité de ces agrégats. La question suivante se pose alors : quelle est la perméabilité des agrégats fractals ?

Une approche simplifiée de cette question peut se résumer ainsi. Il existe une relation qui associe la perméabilité K d'un réseau poreux à sa densité relative, pr , et à la taille moyenne des pores d : $K = (1 - pr) d^2$. Cette relation dite de Carman-Kozeny traduit le fait que la perméabilité d'un réseau poreux augmente naturellement avec la porosité et la taille moyenne des pores permettant le passage du fluide. Cette relation a été appliquée avec succès à de nombreux systèmes granulaires (Brinker *et al*, 1990).

Dans le cas d'un matériau fractal on connaît l'évolution de la densité : EMBED Equation.2 On peut aussi montrer, en utilisant la relation de Carman-Kozeny pour connaître l'évolution de la perméabilité $K(l)$ dans un agrégat fractal en fonction de la longueur d'échelle, que $K(l)$ diminue lorsque la longueur d'échelle diminue, suivant la relation : $K(l) = (1 - (l/a) Df^3) (l^2 - l Df^2)$ a étant la taille des particules primaires. La figure 5 représente cette évolution de la perméabilité locale qui passe de 200 nm^2 à moins de 1 nm^2 lorsque l'échelle diminue entre 50 et 3 nm, c'est-à-dire dans la gamme d'échelle correspondant aux agrégats d'allophane.

Bien sûr, il s'agit d'un modèle simpliste, mais il

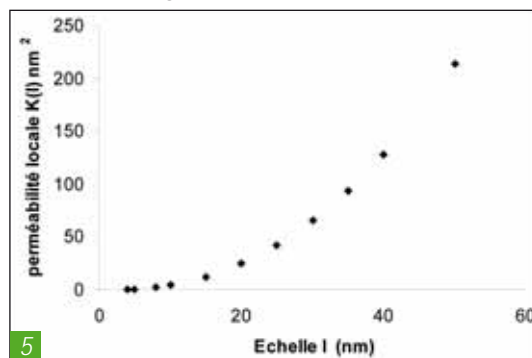


Figure 5 : évolution de la perméabilité locale dans un agrégat fractal en fonction de l'échelle.

montre que compte-tenu de cette structure tortueuse, la perméabilité locale dans un agrégat fractal diminue fortement lorsque la longueur d'échelle diminue. Ces structures fractales peuvent être comparées à des labyrinthes, ce qui signifie que les fluides, liquides ou gazeux, auront de grandes difficultés à se déplacer à l'intérieur de la microstructure des agrégats fractals. Ils sont, en quelque sorte, piégés par confinement et les échanges entre espèces chimiques seront peu nombreux. Cela limitera la minéralisation du C, conduisant à une forte concentration en C de ces sols particuliers.

CONCLUSION

Les andosols sont d'excellents modèles pour étudier les mécanismes de fixation du carbone dans les sols. En effet, ces sols contiennent des argiles particulières ayant un pouvoir de fixation du carbone nettement supérieur à celui des argiles classiques (3 à 4 fois). Ainsi, les andosols de la Martinique ont des concentrations en carbone qui peuvent atteindre 12 % en poids, soit trois fois plus qu'un sol à halloysite voisin.

L'étude de la porosité et de la structure à l'échelle du nanomètre nous a permis de mettre en évidence que cette faculté de piéger du carbone va de pair avec une augmentation de la porosité et de la surface interne accessible, mais aussi avec la structure particulière des agrégats d'allophane. Nous avons donc montré que ces agrégats d'allophane présentent une structure fractale à l'échelle nanoscopique. On peut supposer que cette structure est issue d'une agrégation aléatoire des particules d'allophane de taille 3-4 nm.

Cette structure particulière confère aux agrégats d'allophane des propriétés spécifiques : une forte tortuosité de la phase solide conduisant à une grande surface développée et une faible perméabilité des agrégats d'allophane. Ces deux caractéristiques, grande surface développée et faible perméabilité, sont certainement des paramètres importants expliquant pourquoi ces structures ont une grande capacité à fixer des espèces chimiques et une faible aptitude à les extraire. En effet, compte-tenu de la faible perméabilité des agrégats fractals d'allophane, il sera difficile de faire se rencontrer les espèces chimiques piégées dans les agrégats avec d'autres, susceptibles de les transformer. Par conséquent, ce carbone restera piégé tant

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Basile-Doelsh I., Amundson R., Stone W. E. E., Masiello C. A., Bottero J. Y., Colin F., Masin F., Borschneck D., Meunier J. D., 2005 to appear in Eur. J. Soil Science*
- Boudot J.P., Hadj B.A.B, Chroné T., 1986, Soil Biol. Biochem. 18, p 457*
- Brinker C. J. and Scherer G., 1990 Sol-Gel Science, Academic Press, New York*
- Feller C., Beare M.H., 1997 Geoderma, 79, p 49*
- Mandelbrot B., 1982, The fractal geometry of nature, Freeman, New-York*
- Quentin P., Balesdent J., Bouleau A., Delaune M., Feller C., 1991, Premiers stades d'altération de ponces volcaniques en climat tropical humide (Montagne Pelée, Martinique), Geoderma, 79, p 125*
- Wada, K.J. 1985, The distinctive properties of Andosols, in "Advances in soil science" Stewart B.A. eds Springer Verlag*
- Woignier T., Doumenc H., Rangon L., 2005, J. Sol-Gel Sci. Techn. 8-(1) p 61-68.*

que cette structure fractale sera préservée ; mais si la structure des agrégats d'allophane est détruite par un séchage important (par exemple lors d'une mise en culture du sol), il y a de fortes chances qu'alors la minéralisation soit facilitée. Le carbone se transformera en dioxyde de carbone, augmentant de ce fait les émissions de gaz à effets de serre.

Le raisonnement proposé pour le carbone doit aussi constituer une piste de travail pour comprendre comment les pesticides, et notamment la chlordécone, sont présents dans la structure des sols de Martinique.

Le changement d'échelle est souvent pensé en termes de "comment passer du plus petit au plus grand", de l'échantillon à la parcelle ou de la parcelle à un terroir. Comme nous le montrons dans cet article, la théorie fractale peut nous aider à travailler aussi dans l'autre sens, en extrapolant des propriétés à l'échelle nanométrique, que l'on ne sait pas mesurer, à partir de caractéristiques mesurées à une échelle plus grande. On passe alors "du petit au encore plus petit".



Braudeau E.,
El Ghezal N.,
Crayol M. et Rangon L.
PRAM / IRD

Nouvelle méthodologie de caractérisation des sols

PROBLÉMATIQUE DE LA CARACTÉRISATION DU SOL

Interrogez un pédologue sur sa vision d'un profil de sol : voici quelle pourrait être sa réponse : "C'est un bel exemplaire, typique de la zone, une structure bien développée, humifère en surface, la roche mère et sa position géomorphologique lui confèrent certainement une richesse cationique intéressante...". Puis, pensant à sa collection de sols types, il s'exclamera, "il est vraiment de toute beauté !" ; indépendamment de toute aptitude agronomique...

Le problème perdure : le sol, objet "naturel" pour le pédologue, n'intéresse pas l'ingénieur sous cet angle : ce dernier souhaite une description et une caractérisation *pratiques* du sol, afin de mettre en valeur ses propriétés pour l'agriculture. La question est alors la suivante : comment caractériser le sol pour satisfaire conjointement le naturaliste et l'ingénieur ?

Il s'agit bien là d'un changement d'échelle : comment passer *de la caractérisation des processus observés dans les sols aux échelles microscopiques et localisées, à l'analyse de l'utilisation de ces sols aux échelles macroscopiques et spatialisées.*

Actuellement, la *caractérisation du sol* se réfère aux propriétés que le sol manifeste à l'observateur (la réserve en eau par exemple) et que cet observateur cherche à appréhender selon la problématique d'utilisation qui est la sienne (agronomique, conservatoire...), plutôt qu'à une position naturaliste visant à caractériser la fonctionnalité intrinsèque du sol. Les interrogations portent sur le contrôle et la régulation des différents phénomènes et processus observés à la surface ou dans les sols pour lesquels le *type* de sol est un paramètre important. On citera : l'érosion à la surface du sol, le ruissellement, l'infiltration, les transferts d'eau, de matière, de nutriments, la fertilité, l'activité biologique, etc. La liste est longue et loin d'être exhaustive. Ceci montre que l'objet sol est, dans la plupart des cas, inscrit dans une problématique d'utilisation, de gestion, de sauvegarde ou de protection, d'optimisation des ressources plutôt que de connaissance de l'objet.

La science du sol dans ce cas se situe loin de la Pédologie naturaliste, mais en lien avec des sciences humaines et sociales, car *l'activité sociétale de l'homme y est impliquée.* La caractérisation du sol doit dans ce cas faire face à la diversité des regards portés sur cet objet. Dans cette description empirique du sol, de nombreux tests, dont les conditions expérimentales ont été standardisées à défaut d'être théorisées, exis-

Pôle de Recherche Agro-environnementale
PRAM
de la Martinique

2

tent et produisent des caractéristiques et indicateurs. Mais ceux-ci ne sont valables que dans leur domaine d'application, sans relation théorique possible entre eux ni avec un référent quelconque. A l'opposé, l'approche naturaliste recherche et met en place une caractérisation physique de la fonctionnalité intrinsèque du sol, c'est-à-dire basée sur son organisation interne (soit trois unités fonctionnelles : les particules primaires (sables, limons, argiles), les agrégats et les horizons (Figure 1).

C'est cette dernière approche qui est résumée ici en présentant les résultats récents obtenus au Pôle de Recherche Agro-environnementale de Martinique (PRAM).

MODÉLISER L'ORGANISATION INTERNE DU SOL

Les niveaux d'observation macroscopique des activités ou fonctions du sol intéressant l'agronome (champ, exploitation, région), ne sont que rarement en relation avec les échelles microscopiques auxquelles se déroulent les processus biologiques, chimiques ou physiques qui en sont à l'origine. Or, ces processus se déroulent dans un milieu physique organisé, le sol, constitué de particules solides, d'eau et d'air : les particules solides sont arrangées et positionnées spatialement et forment une structure en agrégats hiérarchisés du sol, alors que l'eau et l'air sont mobiles dans cette structure (l'eau s'interposant entre la phase solide et l'air). Par conséquent, si l'on veut modéliser, et, par là, contrôler et réguler les activités et fonctions du sol au niveau macroscopique, il faut s'appuyer sur une connaissance des processus en cause, non pas au niveau global mais *aux niveaux de la structure du sol auxquels ils ont lieu* (Figure 1).

Il faut également intégrer la connaissance de leurs effets, de niveaux en niveaux fonctionnels, jusqu'à l'échelle macroscopique de l'utilisateur. Ceci sous-entend une connaissance préalable de la structure fonctionnelle et hiérarchisée du « milieu sol », incluant la définition des variables descriptives de chaque niveau d'organisation (par exemple les teneurs en eau inter et intra agrégats primaires, W_{ma} et W_{mi}). Ainsi pourra-t-on décrire et modéliser l'état physique et thermodynamique de ce milieu sol-eau-air organisé ; en effet, ce dernier conditionne et détermine les processus biologiques chimiques et physiques qui s'y déroulent. Cet état physique, résultant de l'interaction entre l'eau et la structure du sol à ses différents niveaux d'organisation, a été appelé "état hydro-structural du sol". Sa modélisation nécessite la détermination quantitative

des variables d'état (volumes spécifiques, teneurs en eau et en air spécifiques, potentiel de l'eau) de chaque niveau fonctionnel de la structure. La prise en compte de la structure du sol dans les équations d'interaction et de transfert de l'eau (et solutés) dans les sols, que traduit le nouveau vocable de "Propriétés hydrostructurales du sol", élargit considérablement le champ de recherche et d'application de la physique du sol et permet notamment d'intégrer la multitude des modèles empiriques portant sur le fonctionnement hydrique du sol, en un seul modèle physique du fonctionnement hydrostructural du sol.

Cette prise en compte de la structure hiérarchisée du sol constitue la nouveauté des méthodes de caractérisation et modélisation des propriétés physiques du sol, mises au point au laboratoire de Pédologie de l'IRD (UR SeqBio) au PRAM, dans le cadre du projet SIRS-Sols de la Martinique (projet financé par le Ministère de l'Outre Mer, 2005-2006). Cela s'est traduit par deux importantes réalisations :

- La réalisation du modèle "Kamel®", modèle physique du fonctionnement hydrostructural du sol qui tient compte de la structure hiérarchisée du sol et des propriétés de gonflement-retrait de son plasma argileux. Ce modèle est gouverné par des équations physiquement établies, dont les paramètres peuvent être soit directement mesurés en laboratoire (cf. point suivant), soit calculés d'après leur signification en fonction d'informations courantes sur le sol comme le pF 4.2, la capacité au champ, etc ; (ou encore, estimés à l'aide des fonctions de pédotransfert, d'après la texture et la teneur en matière organique du sol).

- La mise au point, au laboratoire, d'une caractérisation physique « idéale » des sols qui fournit les 15 paramètres hydrostructuraux, paramètres indépendants des quatre courbes caractéristiques du sol qui seront présentées ci-après. Il s'agit de :

- a) la courbe de retrait $V = f(W)$
- b) la courbe tensiométrique $h(W)$
- c) la courbe de conductivité hydraulique du sol non saturé : $k(W)$
- d) la courbe de gonflement $V(\text{temps})$

W étant la teneur en eau (kg eau/kg sol), V le volume spécifique apparent (dm^3/kg sol), h la succion en kPa (ou dm d'eau) et k la conductivité en dm/s. Ces quatre courbes caractéristiques, ou les 15 paramètres des équations qui les décrivent, constituent les entrées du modèle Kamel®. Ces paramètres sont tirés de la mesure en continu de ces courbes au laboratoire.

KAMEL, NOUVEAU MODELE DE L'INTERACTION SOL-EAU

Ce modèle illustre le changement de paradigme que nous avons mentionné plus haut concernant la physique du sol, laquelle devient une physique de l'organisation interne du sol. Il satisfait en effet aux règles de l'approche systémique : il décrit de manière homogène et cohérente un pédon de sol selon les trois axes de description fondamentaux de tout objet naturel : *i) structure, ii) fonctionnement (ici hydrostructural) et iii) évolution*. Les deux premiers axes constituent le référentiel à partir duquel sont définies toutes les variables d'état ainsi que les paramètres structuraux et fonctionnels du pédon et de son organisation interne (Figure 1).

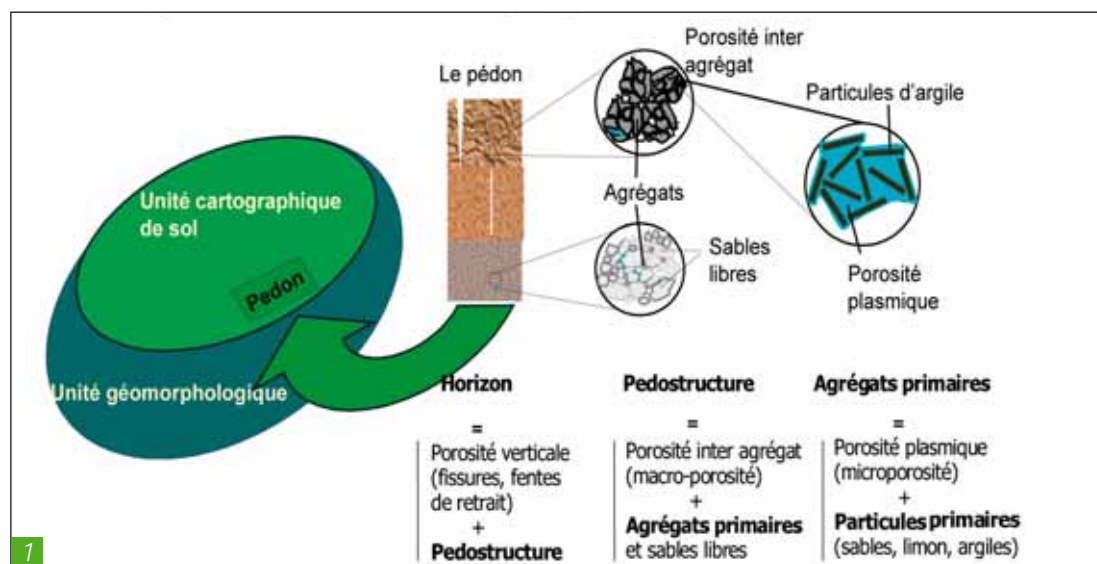


Figure 1 : les différents niveaux d'organisation fonctionnels du sol.



La figure 1 montre la hiérarchie des organisations, de l'unité primaire de sol sur le terrain aux particules primaires de sol (texture), en passant par l'horizon de sol, la pédostucture (volume structural représentatif de l'horizon) et les peds primaires.

Le nouveau terme de pédostucture a une signification physique précise (Braudeau et al. 2004). En effet, il recouvre en même temps : la notion de structure du sol, bien connue en pédologie (Brewer, 1964), généralement décrite comme un assemblage hiérarchique d'agrégats, et la notion de fonctionnalité de cette structure avec l'eau.

La pédostucture est un modèle conceptuel représentatif de la structure fonctionnelle d'un horizon de sol, résultat d'une structuration principalement due aux variations d'humidité et de volume (retrait-gonflement) de la phase argileuse. C'est en partie la raison pour laquelle l'interprétation quantitative de la courbe de retrait (volume spécifique V en fonction de la teneur en eau W) fait de la pédostucture le référentiel de toutes les variables d'organisation et de fonctionnement interne du "milieu sol in situ" à l'échelle de l'horizon. Son organisation interne, incluant les peds primaires, est décrite en termes de volumes spécifiques (volumes poreux, teneurs en eau), soit des volumes rapportés à la masse de la structure solide contenue dans le volume unitaire de la pédostucture.

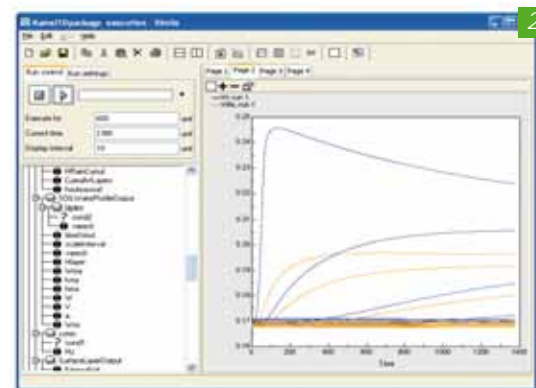
Cette organisation interne est complètement déterminée à l'équilibre par la courbe de retrait : chaque point (W, V) de celle-ci représente l'état d'équilibre entre les différentes phases d'eau, d'air et de solides composant le milieu, à une teneur en eau W donnée (à température et pression constante) (Braudeau et Mohtar, 2006).

LE MODÈLE INFORMATIQUE KAMEL DU FONCTIONNEMENT HYDROSTRUCTURAL DU SOL

Le modèle informatique Kamel® a été écrit dans l'environnement Simile®, logiciel de modélisation et simulation. Il modélise le fonctionnement hydrostructural d'un pédon (figure 1) selon le concept de pédostucture. Ses paramètres d'entrée sont, par horizon, les 15 paramètres ou les quatre courbes caractéristiques de la pédostucture, mentionnés plus haut. Les variables de sorties sont, à un instant donné et en tout point du pédon, les variables d'état de la

pédostucture : potentiel, teneurs en eau et en air, volumes poreux, conductivités hydriques des différents niveaux d'organisation (peds primaires, pédostucture, horizons). Ces variables, spatialisées et dynamiques, peuvent être, soit reprises telles quelles comme variables d'état du milieu dans la modélisation des processus (minéralisation de la matière organique, activité biologique, transport des sels...), soit intégrées sur un volume choisi (épaisseur de sol) et transformées en variables volumétriques (réserves en eau par exemple, densité du sol, capacité au champ...) pour leur utilisation à des niveaux de gestion macroscopiques (parcelles, exploitation agricole, périmètre...). Le modèle réagit sous l'action d'une pluie ou d'une irrigation en surface, ainsi qu'à l'évapotranspiration des racines.

Ces événements produisent un déséquilibre du système, qui revient à l'équilibre en échangeant de l'eau entre la microporosité gonflante des peds primaires, et la macroporosité inter agrégats.



La figure 2 présente un exemple de simulation où l'on suit en fonction du temps (minutes) l'humectation d'un sol sec (à la limite de flétrissement) qui a reçu 20 mm de pluie en une heure : les courbes en bleu sont les teneurs en eau globale tous les 10 cm de profondeur, et celle en jaune représente la teneur en eau dans la microporosité gonflante aux mêmes profondeurs.

On remarque la progression vers l'équilibre, après l'arrêt de la pluie, des teneurs en eau des différentes profondeurs, et l'absorption concomitante de l'eau par la microporosité (courbes en jaune), qui continue à augmenter même après l'arrêt de la pluie.

MESURE DES PARAMÈTRES HYDROSTRUCTURAUX DU SOL

Les mesures en continu des quatre courbes caractéristiques de la pédostucture sont présentées succinctement ci-dessous.

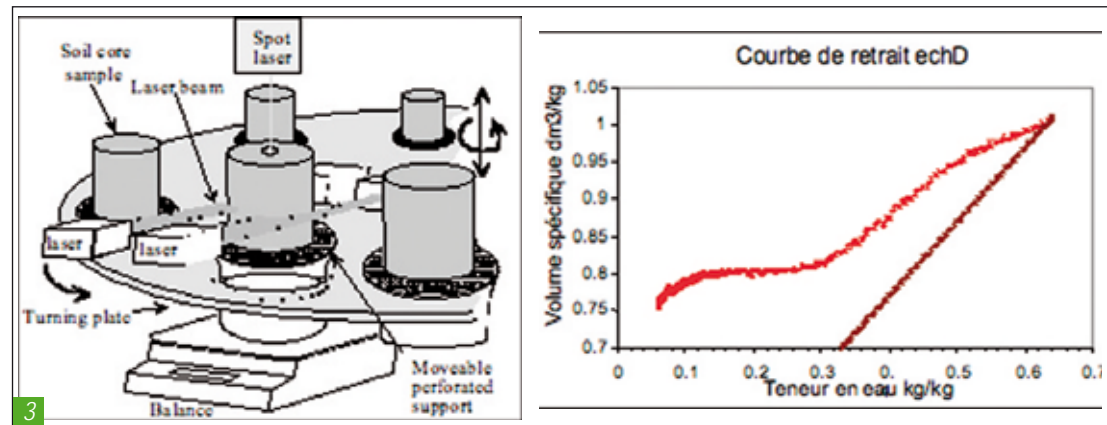
Figure 2 : exemple de simulation du retour à l'équilibre de la pédostucture après une pluie par le modèle Kamel.

Figure 3 : schéma de principe du rétractomètre (Braudeau et al. 1999) et exemple de courbe.

RÉTRACTOMÉTRIE OU MESURE DE LA COURBE DE RETRAIT EN CONTINU

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 3). La courbe de

retrait obtenue est ensuite analysée pour en extraire les 8 paramètres caractéristiques de l'organisation du sol (Braudeau et al. 2004), utilisés ensuite dans le modèle.



MESURE DE LA COURBE DE SUCCION INTER-AGRÉGAT DU SOL

La mesure de la courbe tensiométrique (potentiel de l'eau macroporale, h_{ma}) à l'aide d'un tensiomètre relié à un capteur de pression et une centrale de saisie, donne

accès aux paramètres des courbes de potentiel micro et macroscopique h_{ma}(W_{ma}) et h_{mi}(W_{mi}) (Braudeau et al. 2006). (fig. 4)

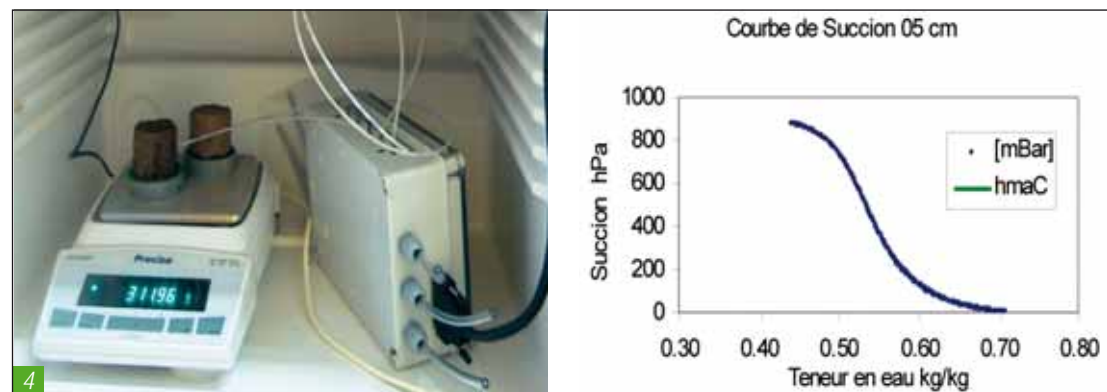




Figure 6 : dynamique du gonflement d'un lit d'agrégats immergés dans l'eau (Braudeau et Mohtar, 2006).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Braudeau E., J. M. Costantini, G. Bellier, and H. Colleuille (1999). New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:525-535.

Braudeau E., J.P. Frangi, R.H. Mohtar (2004). Characterizing non-rigid dual porosity structured soil medium using its characteristic shrinkage curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 359-370.

Braudeau E., R.H. Mohtar (2006). Modeling the Swelling Curve for Packed Soil Aggregates Using the Podostructure Concept. *Soil Sci Soc Am J* 70:494-502.

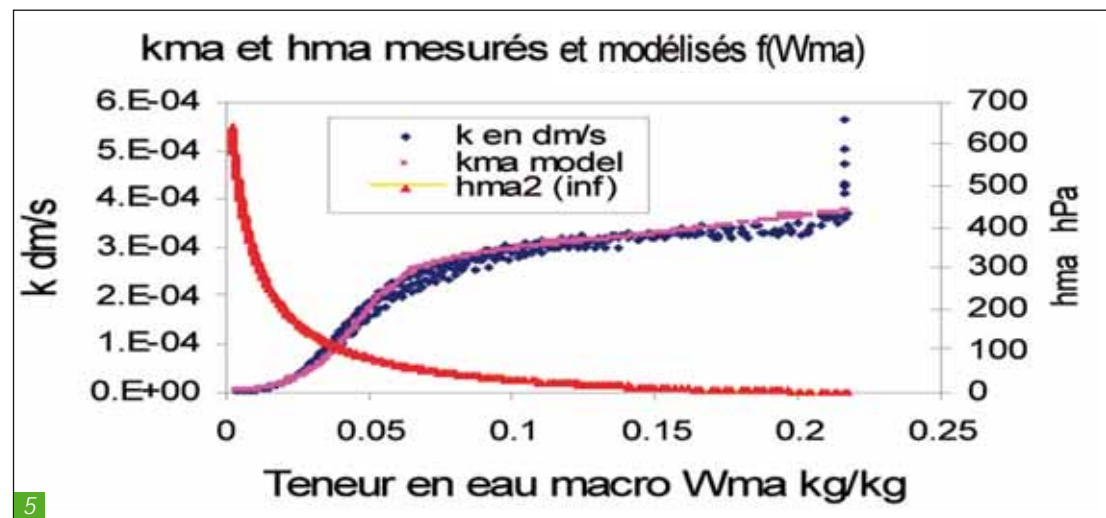
Braudeau, E. and Mohtar, R. H. (2006b) Characterizing and modelling the soil hydrostructural properties I: Development of a new soil physics paradigm. *Eur. J. Soil Sci.* (submitted)
Braudeau, E., Mohtar, R. H., Martin, P., El Ghezal, N., Clouvel, P. and Jallas, E. (2006)

2

MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ DU SOL NON SATURÉ

Le graphique (fig. 5), présente les courbes de conductivité hydraulique de la macroporosité, k_{ma} , fonction de la teneur en eau macroscopique, W_{ma} , mesurée (points bleus) et modélisée (en violet). On a tracé en rouge la courbe de potentiel h_{ma} correspondante, mesurée à la même occasion. Le dispositif de mesure est un

cylindre de sol non remanié, dans lequel sont introduits deux tensiomètres dont l'un près de la surface. L'équation $k_{ma}(W_{ma})$ est une logistique en exponentiel de W_{ma} dont les paramètres sont extraits de la courbe mesurée par ajustement avec l'équation.

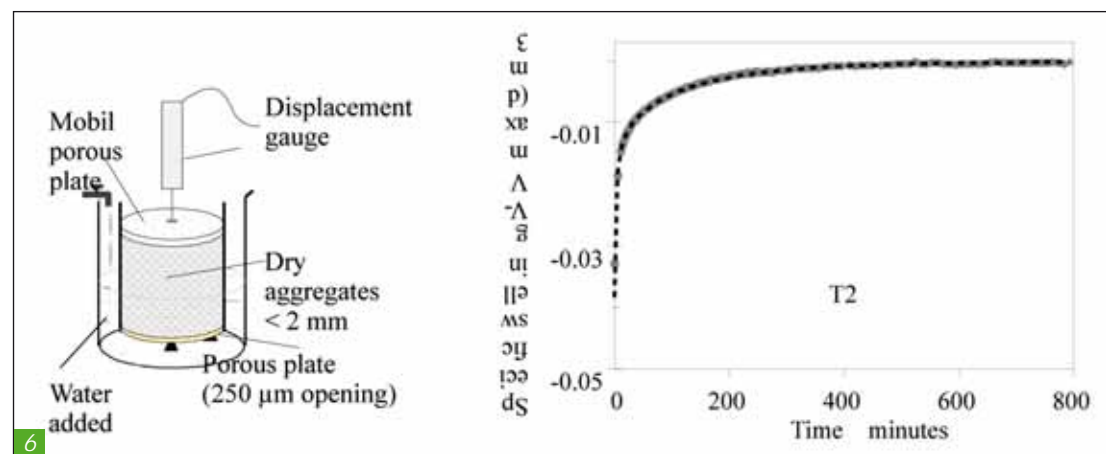


5

MESURE DE LA DYNAMIQUE DE GONFLEMENT DES AGRÉGATS DU SOL DANS L'EAU

La courbe donne accès au paramètre d'échange d'eau entre la microporosité plasmique des peds primaires et la macro-

porosité inter-agrégats. La constante de temps de l'équation de la courbe est caractéristique du type d'argile.



6

Characterizing and Modeling Soil Hydrostructural Properties. Part II: Pedostructure simulation and parameters estimation using the soil water model Kamel®. Eur. J. Soil Sci. (submitted).

Brewer, R. (1964) Fabric and Mineral Analysis of Soils. John Wiley and Sons (Eds), New York.

Crayol M., N. Ghezal et L. Rangon (2006). Notices d'obtention en laboratoire des courbes caractéristiques du sol Rabier F (2006) : Etude pédologique, approche systémique, nouvelle caractérisation des sols et mise en place de la méthodologie associée (Mémoire Master professionnel de F. Rabier).

Simile: System Dynamics and object-based modelling and simulation software.
<http://www.simulistics.com>.

CONCLUSION

Les quatre mesures des paramètres hydrostructuraux du sol qui ont été présentées constituent la manière la plus simple d'obtenir toutes les caractéristiques des propriétés physiques des sols par le calcul de 15 paramètres au minimum. 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. 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. Ceci fait du modèle Kamel® un modèle complet du fonctionnement hydrostructural du sol, sur lequel peut s'appuyer toute modélisation des processus bio-physico-chimiques qui ont lieu dans le sol. Offrant les variables d'état du milieu dans lequel se déroulent ces processus, il permet ainsi de coupler les modèles existants du cycle du carbone, de l'azote, des pesticides..., aux types de sol et à leurs fonctionnements hydrostructuraux.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été fait en partie dans le cadre du projet SIRS-Sols de la Martinique financé par le Ministère de l'Outre Mer que nous remercions. Nous tenons à remercier également "the Kamel team" : Prof. Rabi Mohtar, Purdue University, ABE, Pierre Martin, CIRAD ; Pascal Clouvel, CIRAD ; Mohammad Salahat et Majdi Abou Najim; Purdue University, ABE.



Achard R.
PRAM / Cirad
Martinique,

Cabidoche Y.M.
INRA-APC
Guadeloupe,

Caron A.
PRAM / Cirad
Martinique,

Charlier de Chily A.
PRAM/IRD
Martinique,

Lesueur - Jannoyer M.
PRAM / Cirad
Martinique.

Variabilité de la teneur des sols en chlordécone : conséquences pour l'échantillonnage et étude de la contamination des plantes ...

La chlordécone est un insecticide organochloré qui a été utilisé sur bananeraies jusqu'en 1993 aux Antilles françaises. Malgré l'ancienneté de ces apports, la forte stabilité de la molécule et sa capacité à être retenue par la matière organique des sols font qu'aujourd'hui ces derniers sont encore pollués par la chlordécone et contaminent les eaux qui les traversent [1], ainsi que les plantes, notamment les tubercules, cultivées sur ces parcelles [2].

En préalable à l'évaluation des niveaux de pollution des sols par les organochlorés en Martinique [3], il est apparu nécessaire de préciser les niveaux de risques liés à l'historique cultural et au contexte agro-climatique [4], et de déterminer une méthodologie de prélèvement précise [5]. Il en est de même pour les études des transferts de cette molécule des sols vers les ressources en eaux et vers les tubercules, études pour lesquelles des méthodes ont été adaptées. L'objet de cet article est d'aborder les questions relatives à l'évaluation de la pollution à l'échelle de la parcelle et ses conséquences à d'autres échelles : tant à une échelle localisée (relation de proximité entre la concentration dans la solution du sol et le transfert vers la plante), qu'à l'échelle du bassin de production et/ou du bassin versant.

PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA CONTAMINATION À L'ÉCHELLE INTRA-PARCELLE

La chlordécone a été épandue sous une forme solide (poudre, car la molécule est très faiblement soluble). Les épandages étaient localisés au pied des bananiers et répétés dans le temps (1 épandage tous les 12 à 18 mois selon l'infestation). Ces pratiques, couplées aux propriétés de la molécule ont comme résultat une pollution dont la variabilité spatiale est forte et structurée, cette variabilité est encore observable de nos jours en l'absence de labours. Pour une utilisation plus intensive et plus longue des parcelles, l'emplacement des bananiers a évolué : les rejetons se sont propagés selon la ligne de plantation, et/ou la bananeraie a été labourée et replantée, avec très peu de chances que les nouveaux pieds se retrouvent aux

mêmes positions que les anciens. La variabilité spatiale peut ainsi s'estomper.

Les labours redistribuent la chlordécone de manière complexe. Cette redistribution de la molécule dans l'espace est difficile à analyser a posteriori (création par des labours dressés d'une alternance de bandes de sol contaminées et indemnes, enfouissement de la terre contaminée par labour retourné, interférence de la profondeur de labour avec le modelé). Bien que les stocks résultants sur la totalité des profils de sol soient alors les mêmes, les teneurs mesurées sur la couche superficielle 0-30 cm et leur variabilité spatiale sont alors affectées. L'ancienneté des apports pourrait enfin laisser soupçonner des migrations de la molécule liées à la circulation des eaux et dont résulteraient des gradients de pollution en relation avec leur topographie.

L'inévitable variabilité spatiale des teneurs du sol en chlordécone à l'échelle de la parcelle nécessite donc des mises au point de méthodes pour l'évaluation de la pollution, ainsi que pour l'étude des mécanismes de dispersion de cette molécule dans l'environnement.

Nous nous sommes d'abord intéressés aux conséquences de la variabilité spatiale de la répartition de la chlordécone dans le sol sur la précision de la détermination de la teneur moyenne d'un horizon sur une parcelle. Les conséquences de cette variabilité pour la contamination des cultures sont décrites par la suite. Enfin, sur la base des observations réalisées, une réflexion est menée sur deux aspects :

- l'évaluation des contaminations des productions agricoles ;
- les méthodes d'étude des mécanismes de dispersion de la chlordécone.

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE INTRA-PARCELLAIRE DES TENEURS DU SOL EN CHLORDÉCONE

Concernant l'étude de la variabilité spatiale de la teneur du sol en chlordécone, le premier objectif consiste à établir un protocole de prélèvement à la parcelle avec un niveau de précision suffisant pour l'obtention de valeurs fiables et représentatives des niveaux moyens de pollution des sols.

Cette démarche nécessite la réalisation d'un

nombre important d'analyses ponctuelles au sein de chaque parcelle.

Ainsi seules deux parcelles, plantées de façon continue en bananiers depuis l'époque chlordécone, ont été étudiées :

- une parcelle traitée sur un temps relativement court (entre 1972 et 1975), en pente légère, représentative de parcelles peu polluées (site 1),
- une parcelle longuement traitée (jusqu'en 1993), peu pentue et représentative des parcelles fortement polluées (site 2).

Sur chaque parcelle, pour caractériser la variabilité à l'échelle décimétrique, plus de trente carottes de 5 cm de diamètre ont été prélevées dans la couche superficielle (0-30 cm), selon un maillage carré de 17 m de côté. Pour caractériser la variabilité à l'échelle métrique à proximité de points de ce maillage, des carottages complémentaires ont été effectués à une distance de 1 à 4 m.

Les teneurs observées sur les prélèvements ponctuels montrent (cf. tableau 1) :

une forte pollution sur le site 2 et une faible pollution sur le site 1, en cohérence avec les historiques d'apport. Dans les deux cas, pratiquement tous les points de prélèvements révèlent une teneur supérieure à la limite de quantification (0,02 mg kg⁻¹ de sol sec) et de fortes variations pour les teneurs obtenues (écart type de 60 % de la moyenne pour le site 1 et 30 % pour le site 2).

A l'échelle décimétrique, la forte variabilité des teneurs du sol en chlordécone est confirmée. Aucune organisation spatiale particulière n'est observée sur les parcelles, on ne relève notamment aucun effet lié à la pente (sur le site 1).

A l'échelle métrique, comme cela était supposé du fait du mode hétérogène d'apport de la molécule et de la forte adsorption de la molécule sur le sol, la variabilité locale est très forte (coefficient de variation de 30 et 40 % entre des points situés de 1 à 4 m).

Statistiquement, les distributions des teneurs du sol pour des points distants plus de 15 m suivent une loi normale.

Ainsi, en conservant l'hypothèse de l'absence de gradient de pollution sur les parcelles, il est possible de calculer la précision de détermination de la teneur moyenne du sol d'une parcelle selon le nombre de points d'échantillonnage.

Ces calculs mettent en évidence, pour ces deux parcelles, la faible précision en-dessous d'un échantillonnage sur 20 points (moins de 20 % de précision, cf. tableau 2).

Ceci provient de la forte variabilité spatiale des situations étudiées, à relier à la durée d'apport et/ou à l'incidence de travaux du sol profonds et répétés.

Pour des situations plus ordinaires, un tel échantillonnage peut être considéré comme un majorant assurant une sécurité dans l'estimation de la pollution moyenne d'une parcelle.

Tableau 1. Moyenne de teneur en chlordécone des prélèvements de la couche 0-30 cm réalisés selon un maillage de 17 m

	Chlordécone %>seuil de quantification*	Moyenne des teneurs en chlordécone des (mg/kg de sol)	Ecart type teneurs en chlordécone (mg/kg de sol)
Site 1 (n=31)	97% positifs	0,51	0,33
Site 2 (n=36)	100% positifs	10,12	3,38

* Limite de quantification 0,02 mg/kg

Tableau 2. Résumé du nombre de carottes nécessaires selon la précision souhaitée pour la détermination de la contamination moyenne du sol d'une parcelle pour l'horizon 0-30 cm

Précision souhaitée	30%	20%	16%	15%	13%
Nombre de carottes	8-10	16-20	20-25	25-29	30-36

Source Achard et al, BRGM-CIRAD 2003.



Figure 1 : dispositif de prélèvement pour l'étude de l'effet de la position topographique.

Figure 2 : comparaison des teneurs en chlordécone des couches 0-30 cm des zones de départ (haut) et d'accumulation (bas) dans les parcelles en pente sur andosols (Guadeloupe) (échantillon composite de 6 prélèvements par position, bananeraies pérennes).

EFFET DE LA POSITION TOPOGRAPHIQUE SUR LA RÉPARTITION SPATIALE INTRA-PARCELLE DE LA CHLORDÉCONE

Il est cependant important de valider l'absence de gradient, notamment sous l'influence de la topographie (facteur pente), pour la mise en œuvre des plans d'échantillonnage proposés précédemment.

La chlordécone a été appliquée de façon régulière sur les parcelles, mais des transferts ont pu intervenir au sein de la parcelle selon deux modes :

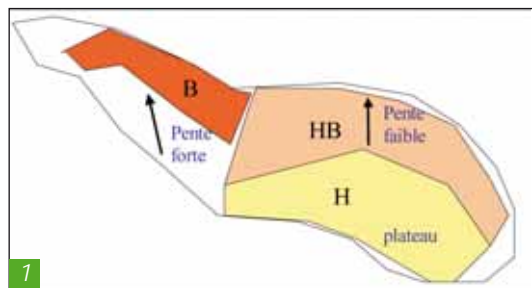
- par voie solide (déplacement des particules de produit appliqué et/ou de particules de sol pollué), sous l'effet de l'érosion sur les pentes,
- en solution, sous l'influence de flux hydriques latéraux hypodermiques.

Ces transferts auraient pour conséquence l'existence de gradients de pollution du sol, du haut vers le bas, avec une accumulation vers les zones basses de la parcelle.

Nous avons donc recherché l'existence de ce gradient lié à la topographie sur une parcelle ayant reçu un faible nombre d'apports de chlordécone.

La parcelle comporte une partie haute constituée d'un plateau, et deux parties plus basses, l'une directement en aval du plateau, présentant une faible pente (15 %), et une deuxième partie basse, d'une pente plus forte (25 %).

Trois échantillons composites ont été constitués, sur la base du prélèvement de 25 points disposés selon une maille de 10 x 20 m, et expédiés pour analyse de leur teneur en chlordécone.



L'analyse des échantillons composites révèle très peu de différences entre les trois zones topographiques à l'intérieur de la parcelle (teneur [0-30cm]) :

- zone H-plateau = 0,180 mg/kg,
- zone HB-pente faible = 0,120 mg/kg,
- zone B-bas = 0,160 mg/kg.

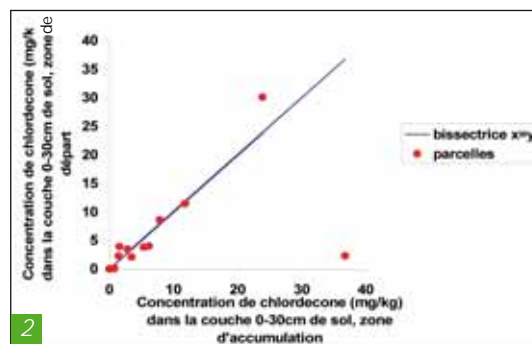
La teneur du sol la plus élevée correspond à la position topographique de la zone haute de la parcelle (zone H), la zone basse présentant une teneur un peu plus faible. La teneur légèrement moins élevée en zone de faible pente (HB), aurait pu avoir pour origine un départ de terre superficiel par érosion, mais en l'absence d'accumulation dans les parties basses (B), cette hypothèse ne peut être validée.

La variation d'environ 20 % des teneurs du sol constatée entre les trois sous-parcelles peut s'expliquer par l'effet de l'échantillonnage, puisqu'une variabilité du même ordre de grandeur est attendue entre plusieurs échantillons composites issus d'un prélèvement sur 20 points (cf. tableau précédent).

En conclusion, la différence de position topographique n'induit pas de modifications sensibles de la teneur du sol en chlordécone.

L'absence de différence liée à la topographie, est donc à interpréter avant tout comme l'absence de redistribution latérale de la pollution via des écoulements hydriques dans l'horizon de surface pollué.

La comparaison des teneurs du sol en haut et en bas de parcelles en Guadeloupe confirme le peu d'effet de la position topographique, sauf dans les cas de fortes pentes et de travail manuel, où les parties hautes peuvent connaître un décapage progressif sous l'effet des gestes de travail toujours descendants (Figure 2, [6]).



VARIABILITÉ DE LA CONTAMINATION RELATIVE DES PLANTES ET DES SOLS À PROXIMITÉ

Pour déterminer l'incidence de la variabilité de la teneur sol au sein de la parcelle sur la contamination des plantes, une étude de la variabilité de la réponse-plante en relation avec la teneur du sol, a été réalisée sur quatre parcelles sur andosols cultivées en dachine (*Colocasia esculenta*, tubercule de consommation courante en Martinique). Sur chaque parcelle étudiée, cinq couples d'échantillons de sol et de plante ont été constitués par la collecte de cinq plantes et du sol à leur pied (horizon 0-30 cm,) et répartis aléatoirement sur la surface de la parcelle (chaque point de prélèvement était indépendant des autres, et distant d'au moins 10 m).

Les échantillons pour analyse sont ensuite réalisés par homogénéisation du sol par mélange, et par prélèvement d'une aliquote représentative sur les tubercules après lavage (suppression des traces de terre). Les teneurs en chlordécone du sol et des plantes ont été déterminées au laboratoire après extraction par chromatographie en phase gazeuse.

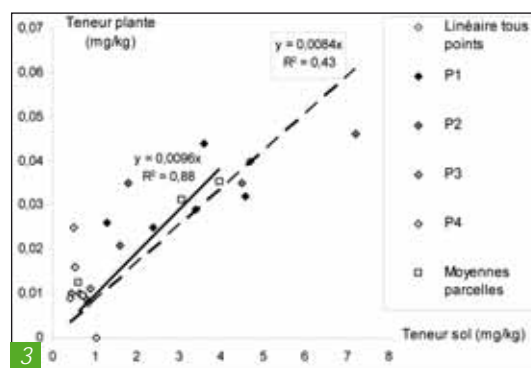


Figure 3 : teneur en chlordécone du sol et des tubercules sur plusieurs échantillons composites collectés sur des parcelles cultivées en dachine.

Figure 4 : relation entre la contamination de navets et celle d'un sol ferrallitique au contact.

NB : P1, P2, P3, P4 : parcelles où ont été prélevés les échantillons composites.
Moyenne P : valeur moyenne de chacune des parcelles.

Les résultats (figure 3) montrent la forte variabilité des teneurs sol des échantillons composites : le coefficient de variation se situe entre 25 et 40 %. Ce résultat confirme l'existence d'une forte variabilité spatiale de la teneur en polluant du sol (P1 et P2).

La variabilité intra-parcelle de la réponse-plante observée est faible sur la parcelle P3, alors qu'elle est très élevée sur la parcelle P4. Pour ces deux parcelles, la différence de comportement

n'est pas liée au niveau de pollution du sol, mais bien à la réponse apparente de la plante.

Globalement, sur ces quatre parcelles, la réponse de la plante apparaît proportionnelle à la teneur du sol, même si cette relation est de qualité médiocre ($R^2 = 0,43$ en imposant un passage par l'origine). Les teneurs moyennes des 20 points de prélèvement par parcelle montrent une proportionnalité entre les teneurs des tubercules et celles des sols ($R^2 = 0,88$).

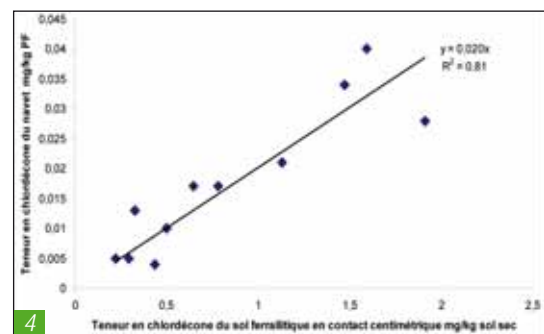
Sur ce faible nombre de cas, la forte dispersion de la réponse des plantes ne semble pas s'opposer à une réponse moyenne de type linéaire. La dispersion de la réponse apparente sur des échantillons de faible effectif reflète donc la forte dispersion des réponses apparentes au sein d'une parcelle, ce qui avait déjà été observé lors d'analyses réalisées individuellement [2].

Finalement, cette dispersion apparaît liée aux variations locales de teneur du sol en polluant, mais aussi à une variabilité de la réponse de la plante, sous l'effet de plusieurs mécanismes possibles :

- le statut hydrique au cours du cycle et à proximité des plantes,
- l'impact de la répartition de la pollution à l'échelle locale (échelle centimétrique),
- le statut organique à proximité de la plante.

Toutefois, lorsque l'on circonscrit les prélèvements de sol contaminant au premier centimètre de sol au contact d'un légume racine récolté, la relation de contamination significative est bien proportionnelle, pour chaque individu récolté et son sol encaissant, comme l'indique la figure 4, relative à une culture de navet sur sol ferrallitique [6].

La relation entre contamination des "racines"





RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] IFEN, *Les pesticides dans les eaux. Données 2003 et 2004.*

http://www.ifen.fr/publications/dossiers/PDF/dossier_05.pdf

[2] Bellec S., Godard E., 2002. *Contamination par les produits phytosanitaires organochlorés en Martinique :*

caractérisation de l'exposition des populations. Ministère de l'Emploi et de la Solidarité, Direction de la Santé et du Développement Social de la Martinique, 38 p.

[3] Desprats, J. F., Comte, J.P. et Chabrier, C., 2004. *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 3. Rapport BRGM-CIRAD / RP-53262-FR, 25 pp.*

[4] Desprats, J. F., Comte, J.P. et Perian G., 2003. *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 2. Rapport BRGM-CIRAD / RP-52257-FR, 26 pp. plus cartes.*

[5] Achard R., Perrier X., Chabrier Ch., Lassoudière A. (2003) - *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 1. BRGM/RP-52257-FR.*

et celle des sols devient donc plus nette lorsque l'on évalue la teneur des sols au contact immédiat de l'organe souterrain ; on peut en tirer les deux conclusions suivantes :

- La contamination des racines se fait essentiellement par diffusion au contact immédiat du sol.
- La distribution hétérogène de la chlordécone dans le sol est la cause principale de l'hétérogénéité de contamination des "racines".

CONCLUSION ET CONSÉQUENCES POUR LA GESTION DES IMPACTS DE CETTE POLLUTION

Détermination des niveaux de pollution à l'échelle de la parcelle

Malgré l'ancienneté des pollutions par la chlordécone, probablement du fait de l'épandage initialement localisé au pied des bananiers et d'effets complexes des travaux de sols réalisés par la suite, il a été observé une importante variabilité spatiale des teneurs du sol en chlordécone de l'horizon de surface. En l'absence d'érosion, les transferts de chlordécone au sein de la parcelle semblent faibles et ne provoquent pas l'apparition de gradient de pollution lié à la topographie.

Du fait de la possibilité d'une forte variabilité spatiale de la teneur du sol en chlordécone, il est recommandé, pour l'estimation de la teneur moyenne d'une parcelle sur un horizon, de procéder à un prélèvement d'au moins 20 points, avec une répartition homogène des points sur la parcelle.

Détermination des niveaux de contamination des cultures

Une forte variabilité intra parcelle de la réponse de la plante par rapport au niveau de pollution du sol à proximité a également été observée. La variabilité identifiée serait avant tout liée à la prédominance d'un transfert vers la plante de la chlordécone à partir du sol en proximité immédiate (à l'échelle centimétrique). Il en résulte une très forte variabilité intra parcelle de la contamination des plantes, correspondant au cumul de la variabilité de la réponse plante et de la variabilité spatiale de la teneur du sol.

Avec un échantillon composite issu de la collecte

de cinq plantes, le résultat peut s'écarter notablement de la valeur moyenne de contamination des plantes. Ce type d'échantillonnage généralement adopté pour l'analyse du produit avant commercialisation présente une bonne sensibilité, mais aussi une faible reproductibilité. Pour l'étude de la contamination des tubercules et l'établissement de référentiels de risque de contamination des tubercules, il est donc nécessaire de réaliser un échantillonnage de 20 plantes minimum.

PERSPECTIVES

Evaluation du transfert vers les végétaux

Les activités conduites au PRAM ont déjà permis d'acquérir les connaissances de base nécessaires à une évaluation des pollutions de la chlordécone à l'échelle de la parcelle et à une estimation de la variabilité de la pollution existante au sein d'une parcelle. Elles contribuent aussi à la réflexion sur la mise en place de dispositifs d'évaluation et de contrôle des contaminations des plantes par la chlordécone, les tubercules en particulier.

Les travaux repris ici font essentiellement état de la variabilité des contaminations des tubercules intra-parcelles, et dans une moindre mesure, de la variabilité de la réponse inter-parcelles pour un même type de sol. Des études complémentaires montrent qu'au sein d'un même type de sol, la variabilité entre parcelles de la réponse plante peut être non négligeable ; néanmoins, la teneur du sol constitue une variable clé d'évaluation du risque de contamination pour un type de sol donné [7].

Par ailleurs, un effet notoire du type de sol sur le transfert vers les plantes a été observé chez des producteurs comme en milieu contrôlé : le transfert de chlordécone vers la patate douce est plus important sur sols brun-rouille que sur andosols [6].

Ces études, encore très partielles, devront être complétées notamment sur les aspects suivants :

- les modalités de transfert de la chlordécone du sol vers les cultures de tubercules, en précisant l'incidence des différents types de sols, mais aussi des facteurs climatiques et techniques permettant de limiter la contamination des cultures,
- l'étude du rôle de la matière organique sur les

[6] Cabidoche Y.-M., Clermont-Dauphin C., Lafont A., Cattan P., Achard R., Caron A., Chabrier C., (2006) *Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture (APR 2002). Rapport final d'exécution, MEDD, 100 pp.*

[7] Achard R., Caron A., Nelson R., Perrier X., Dubois C., Duféal D. et Chabrier C., (2006). *Contamination des tubercules par le chlordécone sur sols pollués par cet organochloré en Martinique : Etude du transfert en parcelles de productions et approches expérimentales complémentaires ; rapport final d'exécution.*

modalités de stockage et de relargage de la chlordécone du sol vers les eaux et les végétaux (projet MOM IRD-Cirad),

- l'élargissement de l'état des lieux des contaminations à l'ensemble des cultures (et pas uniquement les racines et tubercules) par le SRPV,
- la conduite d'expérimentations pour évaluer

la sensibilité à la contamination par la chlordécone d'autres cultures, afin de pouvoir proposer des modalités de gestion des parcelles polluées ou des cultures alternatives en fonction du niveau de pollution,

- l'évaluation de l'impact de cette pollution à l'échelle des bassins versants sur les écosystèmes aquatiques et marins (projet MOM Cemagref-Cirad).



Salmon F.
PRAM / Cirad.

La création de nouvelles variétés de bananes : un défi environnemental

En Martinique, l'économie agricole repose en grande partie sur la filière banane. Or, la durabilité de cette filière est menacée par des contraintes socio-économiques et environnementales. Parmi ces dernières, l'une des principales est la nécessité de réduire globalement l'usage des pesticides. Partant de cette problématique agro-environnementale, une démarche de recherche finalisée doit être poursuivie. L'idée développée ici est de créer des variétés capables de se défendre seules contre les différents parasites. L'objectif final est en effet de ne plus avoir recours aux pesticides. La mise en place de cette recherche suit une logique de processus d'innovation qui conduit à développer une méthodologie efficace, à expérimenter et tester sa faisabilité à différentes échelles, à adapter l'itinéraire technique aux contraintes de l'ensemble de la filière, et enfin à transférer ces variétés à la profession pour une large diffusion.

On passe de la sélection de la variété potentielle à la parcelle de production, et de la création variétale à la commercialisation à grande échelle. L'innovation variétale peut ainsi être définie comme un processus long et continu, qui mène de l'idée de recherche au transfert réussi de solutions pertinentes vers ses bénéficiaires finaux. Dans cet article, nous verrons que la culture de la banane aux Antilles est soumise à un certain nombre de contraintes. Nous expliquerons ensuite comment obtenir une variété aboutie qui réponde aux objectifs fixés. Enfin, nous aborderons les perspectives d'utilisation de ces nouvelles variétés.

DU CONSTAT A LA PROBLEMATIQUE AGRO-ENVIRONNEMENTALE

Un ancrage important dans l'économie martiniquaise

La production bananière est une composante socio-économique majeure en Martinique. Elle occupe 29 % des surfaces agricoles utilisées, pour une production essentiellement tournée vers l'exportation (source : service statistique de la DAF - Martinique). En 2005, 88 % des 260 milliers de tonnes de bananes produites étaient destinés au marché export. Cette production repose exclusivement sur l'utilisation de variétés du groupe standard Cavendish (98 %). C'est la même variété qui est produite en Martinique,

au Costa Rica et en Côte d'Ivoire. En conséquence, les producteurs martiniquais sont en concurrence directe avec les autres pays exportateurs de bananes, notamment ceux des zones "dollar" et Afrique. Or, le coût de main d'œuvre sur l'île reste particulièrement élevé, de 6 à 28 fois supérieur à ceux des pays concurrents. Ainsi, la concurrence mondiale place les producteurs antillais en position de faiblesse sur le marché export.

Néanmoins, la production intensive de banane "dessert" demeure essentielle dans le paysage socio-économique de l'agriculture martiniquaise. En 2005, 50 % de la population active agricole travaillait dans la production bananière, ce qui représente 6000 emplois directs et pratiquement autant d'emplois indirects.

Une culture menacée par des problèmes phytosanitaires

Sur le plan biologique, la monoculture bananière est soumise à de fortes contraintes parasitaires dues en particulier à *Mycosphaerella musicola*, agent de la maladie de Sigatoka ou cercosporiose jaune. *Mycosphaerella musicola* est un champignon microscopique qui colonise la surface des feuilles. Celles-ci se dessèchent et se nécrosent, ce qui induit une insuffisance de la photosynthèse, et donc une sous-alimentation de la plante. La conséquence sur la qualité des fruits est, qu'une fois récoltés, ceux-ci mûrissent avant d'arriver aux consommateurs.

La cercosporiose jaune induit des traitements aériens



Les variétés Cavendish cultivées sont très sensibles à la cercosporiose jaune, maladie foliaire dont le contrôle est indispensable avant exportation. Pour lutter contre une telle pression parasitaire, les seuls moyens connus actuelle-

Figure 1 :
symtômes de la
cercosporiose jaune.

ment sont les épandages aériens fréquents de fongicides et d'huiles. Ce type de lutte reste polluant pour l'environnement, néfaste pour l'industrie touristique (importante aux Antilles) et coûteux pour les producteurs. En 2005, la moyenne était de 9,6 traitements par an.

Bien que cette lutte soit raisonnée (dans le cadre d'un système d'avertissement bioclimatique), des cas de résistance à certaines familles de fongicides sont apparus dans les Antilles françaises. Le choix des fongicides est donc de plus en plus restreint.

En 2005, seules deux molécules de la famille des triazoles étaient utilisables, ce qui conduit à une perte d'efficacité des fongicides.

De plus, la législation dans ce domaine se radicalise. Selon l'arrêté du 5 mars 2004 relatif à l'utilisation par voie aérienne des produits mentionnés, aucun traitement aérien n'est admis à moins de 50 m des habitations et des points d'eau. Or, les Antilles françaises sont des milieux insulaires fortement anthropisés. Dans ce contexte, 20 % des bananeraies ne peuvent plus être traitées en Martinique.

A terme, les traitements aériens risquent d'être interdits sur tout le territoire.

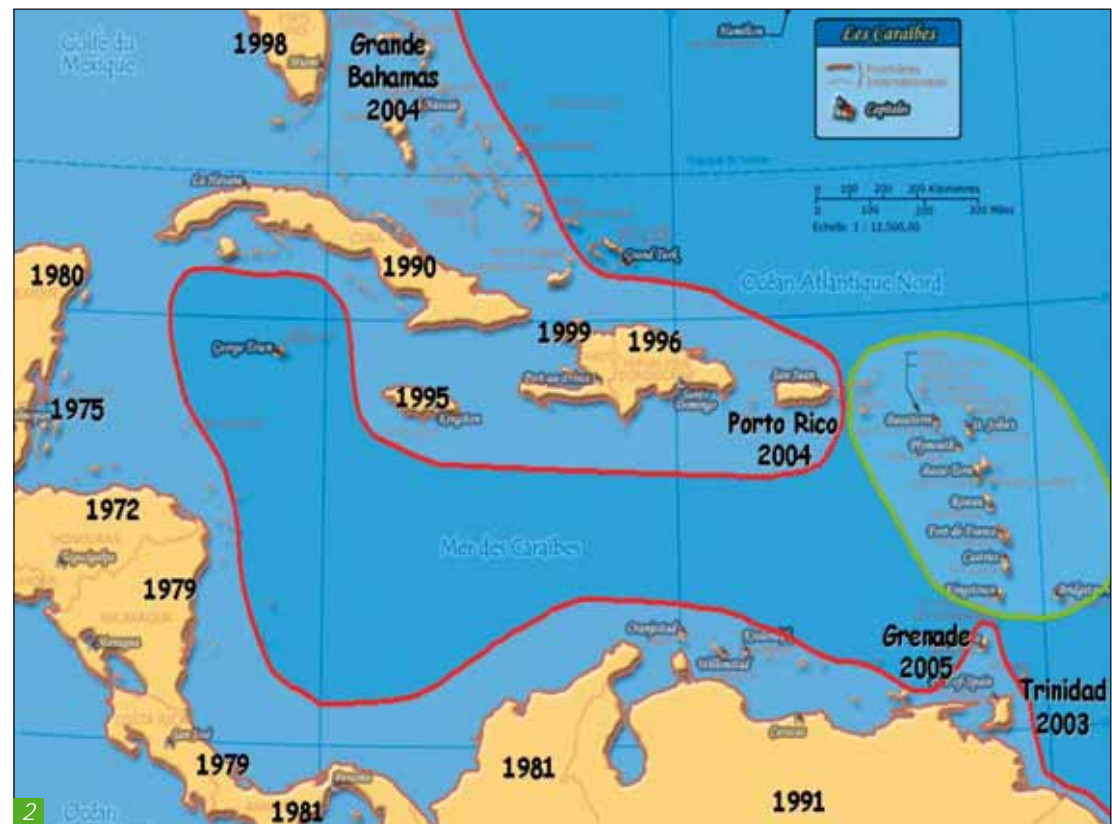
L'arrivée de la cercosporiose noire impliquerait beaucoup plus de traitements

Les Antilles françaises sont également sous la menace de l'apparition d'une maladie apparentée plus grave : la maladie des raies noires, ou cercosporiose noire causée par une espèce parasite : *Mycosphaerella fijien-sis*, qui a la particularité d'être plus rapide à se multiplier que son "cousin" *M. musicola*.

Cette maladie n'est pas encore présente en Martinique. Identifiée pour la première fois dans le Pacifique (îles Fidji) en 1963, la maladie des raies noires est arrivée sur le continent américain au Honduras en 1972 (cf. figure 2).

Depuis, la maladie progresse d'année en année sur le continent et depuis une quinzaine d'années dans l'arc caribéen : Cuba, République Dominicaine, Jamaïque, Haïti, et Porto Rico au Nord, Trinidad et Grenade au Sud, sont désormais touchés (*Fortune et al., 2005*).

Figure 2 :
progression de la
Cercosporiose noire
dans la Caraïbe.



1972 Zone où la Cercosporiose noire est présente et l'année de détection.

Zone indemne de la Cercosporiose noire



L'introduction de ce parasite induirait une multiplication par 3 des traitements fongicides. S'ensuivraient un accroissement de la charge polluante et bien entendu des coûts de traitements. Aux Antilles, on estime à 40 % les surfaces cultivées qui pourraient de ce fait être abandonnées.

Les nématodes

Les nématodes sont des vers microscopiques telluriques. Sur le bananier, les plus redoutés par les producteurs sont *Radopholus similis* et *Pratylenchus coffae*. Ils provoquent en effet des lésions et nécroses au niveau des racines, constituant ainsi des portes d'entrées pour les parasites secondaires tels que champignons ou bactéries. Dès qu'il le peut, le nématode quitte la racine. Il pénètre dans le sol et se laisse transporter par les flux d'eau jusqu'à une nouvelle racine, ce qui explique la rapidité d'infestation. Les dégâts entraînés se manifestent par des perturbations de la nutrition minérale et hydrique.

Mais surtout, l'ancrage au sol est affaibli ce qui peut entraîner des chutes de plants, notamment en périodes ventées. Les pertes de rendement varient en fonction du niveau d'infestation et des espèces présentes, mais aussi des conditions environnementales (sol, climat, pratiques culturales...). Ces pertes se cumulent au cours des cycles et diminuent la durée d'exploitation d'une bananeraie.

Pour lutter contre ces parasites, la lutte chimique est déclenchée sur avertissement biologique. La pratique de la jachère, la mise en place de drains de ceinture et la plantation de vitroplants sains ont permis de réduire de plus de 60% les tonnages de matières actives utilisées en Martinique : de 84 tonnes sur 8600 hectares en 1996 à 30 tonnes sur 8 200 hectares en 2004, avec des rendements similaires (Chabrier *et al.*, 2005). Le nombre de traitements est passé en moyenne de 2,1 à 0,8 en 10 ans (cf. figure 3).

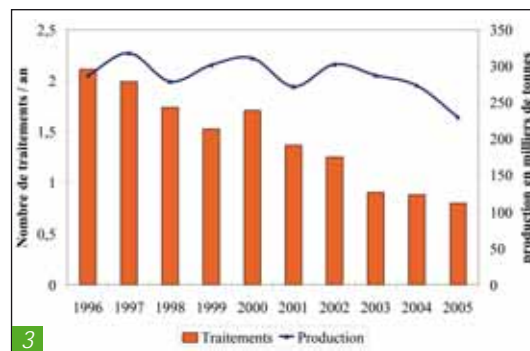


Figure 3 : évolution du nombre moyen de traitements nématicides par an dans les bananeraies martiniquaises (D'après Chabrier *et al.*, 2005).

Mais ces pratiques culturales assainissantes ne permettent pas pour l'instant, dans le cas de la variété Cavendish, de maintenir tout au long de la vie d'une bananeraie, un niveau d'infestation minimale qui n'impliquerait aucun traitement nématicide.

Le niveau de sensibilité aux nématodes n'est pas le même selon les variétés. Les nématodes ne se développent pas toujours à la même vitesse, et de ce fait, ne vont pas entraîner les mêmes dégâts.

DE LA VARIÉTÉ POTENTIELLE À LA PARCELLE DE PRODUCTION

Compte-tenu des problèmes posés par le recours systématique aux pesticides, l'idée développée par le Cirad depuis plus de 20 ans est de créer de nouvelles variétés de bananes ne nécessitant pas l'usage massif de ce type de produits. La variété idéale, ou idéotype, devrait alors réunir les qualités suivantes :

- être résistante aux cercosporioses,
- être tolérante aux nématodes,
- être différenciable du standard Cavendish aux yeux des consommateurs, et,
- être adaptée aux critères d'une production raisonnée.

Mais avant d'espérer développer et diffuser la variété idéale, le chemin est long et s'appuie sur une méthodologie que nous allons maintenant détailler.

Des variétés ancestrales comme parents

Les variétés ancestrales de bananiers portent des fruits remplis de graines. Elles sont donc fertiles, mais impropres à la consommation. Depuis plusieurs milliers d'années, l'homme s'est évertué à cultiver et à sélectionner des bananiers dont les fruits ont de moins de moins de graines. Les résultats de cette sélection massive sont les variétés cultivées aujourd'hui, qui ne produisent plus ni pollen ni graine et par conséquent, sont stériles. La particularité de ces bananiers est qu'ils sont parthénocarpiques. Cela leur permet de produire des fruits sans fécondation des fleurs, contrairement à la pomme ou à la goyave par exemple.

La stratégie du Cirad n'est pas d'améliorer ces variétés cultivées existantes, mais de créer par des techniques d'amélioration conventionnelle de nouvelles variétés directement à partir des variétés ancestrales, rassemblant le maximum des caractéristiques recherchées (Jenny *et al.*, 2004). En Guadeloupe, le Cirad possède une collection de 450 accessions. Celle-ci offre une bonne représentation de la variabilité génétique naturelle des bananiers. Elle sert donc de base aux croisements. Le choix des deux parents se fait sur plusieurs critères :

- fertilité, car les croisements ne sont possibles que si le bananier produit du pollen et que celui-ci est fertile,
- aptitude à la combinaison,
- caractéristiques phénotypiques : le but est de concentrer en un même bananier le maximum de caractères complémentaires favorables apportés par les deux parents (résistances, qualité du fruit, caractères agronomiques comme la hauteur ou le rendement).

Le croisement se fait par hybridation. Le pollen du parent mâle est déposé manuellement sur les fleurs du parent femelle au moment de la floraison. Lorsque les fruits arrivent à maturité, environ deux mois et demi après la fécondation, les graines contenues dans les bananes sont recueillies. Chaque graine est différente et représente potentiellement un bananier, soit une variété potentielle. Malheureusement, toutes les graines ne sont pas viables et très souvent, peu de graines sont produites. C'est pourquoi, pour exploiter au maximum les graines créées et donc augmenter la chance de sélectionner notre idéotype, toute graine recueillie passe par une phase de culture sur milieu gélosé, ce qui facilite le sauvetage des embryons. Une fois les graines germées, les plantules formées sont sevrées. On passe alors du laboratoire à la parcelle expérimentale. On aboutit à une population d'hybrides prêts à être évalués en plein champ.

Plus on sélectionne, plus on multiplie ...

La sélection des hybrides « dessert » est réalisée sur une base phénotypique en station. Au CIRAD, un protocole d'observation et de sélection multicritères a été établi : VaNouBa pour "Validation de Nouvelles variétés de Bananes". Cette procédure intègre tous les aspects de l'évaluation en conditions réelles ainsi qu'en

laboratoire : agronomie, phytopathologie, physiologie et génétique. Dans ce processus VaNouBa, quatre phases sont à distinguer par le nombre d'individus mis en jeu et les observations réalisées (Salmon *et al.*, 2005).

- **Phase I** : chaque individu de la population hybride est évalué sur des critères drastiques : port de la plante, hauteur, conformation du régime, longueur de cycle, et première évaluation de la qualité gustative des fruits. On réalise alors une sélection négative, c'est-à-dire l'élimination de tous les individus qui ne répondent pas aux critères minima. Seuls 10 % des hybrides, en moyenne, passent cette étape.
- **Phase II** : Chaque individu sélectionné en phase I est multiplié en cinq exemplaires conformes. Son potentiel agronomique et qualitatif est testé sur deux cycles de culture. Une première évaluation du comportement au champ vis-à-vis de la cercosporiose jaune est effectuée. On réalise alors une sélection positive au cours de laquelle seuls les quelques génotypes possédant un réel avenir passent en phase III.
- **Phase III** : Les hybrides retenus sont indexés pour vérifier l'absence de tout virus et multipliés à deux cents exemplaires par culture in vitro de façon à pouvoir mettre en place des parcelles d'une taille suffisante pour des observations significatives. La caractérisation se fait au niveau agronomique, afin de déterminer l'itinéraire technique, le rendement potentiel et le comportement du bananier au champ. C'est aussi à ce stade que les hybrides sont testés sur leur comportement vis-à-vis des principaux agents pathogènes. Cela se fait de deux façons complémentaires : au champ pour les maladies présentes sur le site d'expérimentation comme la cercosporiose jaune, et en conditions contrôlées pour les autres comme la cercosporiose noire (Abadie *et al.*, 2005) ou les nématodes (Quénéhervé *et al.*, 2006). Enfin, les paramètres de qualité post-récolte



(fonctionnelle et nutritionnelle) sont aussi évalués. A l'issue de cette phase, on possède la carte d'identité de la variété potentielle.

- **Phase IV** : C'est la phase de validation. Les bananiers sont évalués chez les producteurs en conditions de production. Il s'effectue alors un nouveau changement d'échelle. On passe de la parcelle expérimentale à la parcelle de production. L'amplification des nouvelles variétés de bananiers se fait par multiplication végétative *in vitro*. L'objectif est de tester la nouvelle variété dans l'ensemble de la filière : le laboratoire de multiplication *in vitro*, le serriste, le producteur, le transporteur en bateau, le mûrisseur, le distributeur et les consommateurs.

Ce n'est qu'à l'issue de ce long processus (10 à 15 ans) que la variété sera validée. Son lancement commercial sera alors du ressort des différents acteurs économiques de la filière.

La montée en puissance s'accompagne proportionnellement d'une augmentation du nombre de partenaires, d'une implication de plus en plus forte des acteurs de la filière, d'un coût de l'innovation qui va croissant, et de surfaces plantées de plus en plus importantes.

A chaque étape du processus d'innovation, à chaque changement d'échelle, le développement des variétés peut être stoppé ou validé.

L'innovation variétale est un processus évolutif et continu.

Le programme d'innovation variétale "banane" est un programme qui a débuté au Cirad il y a

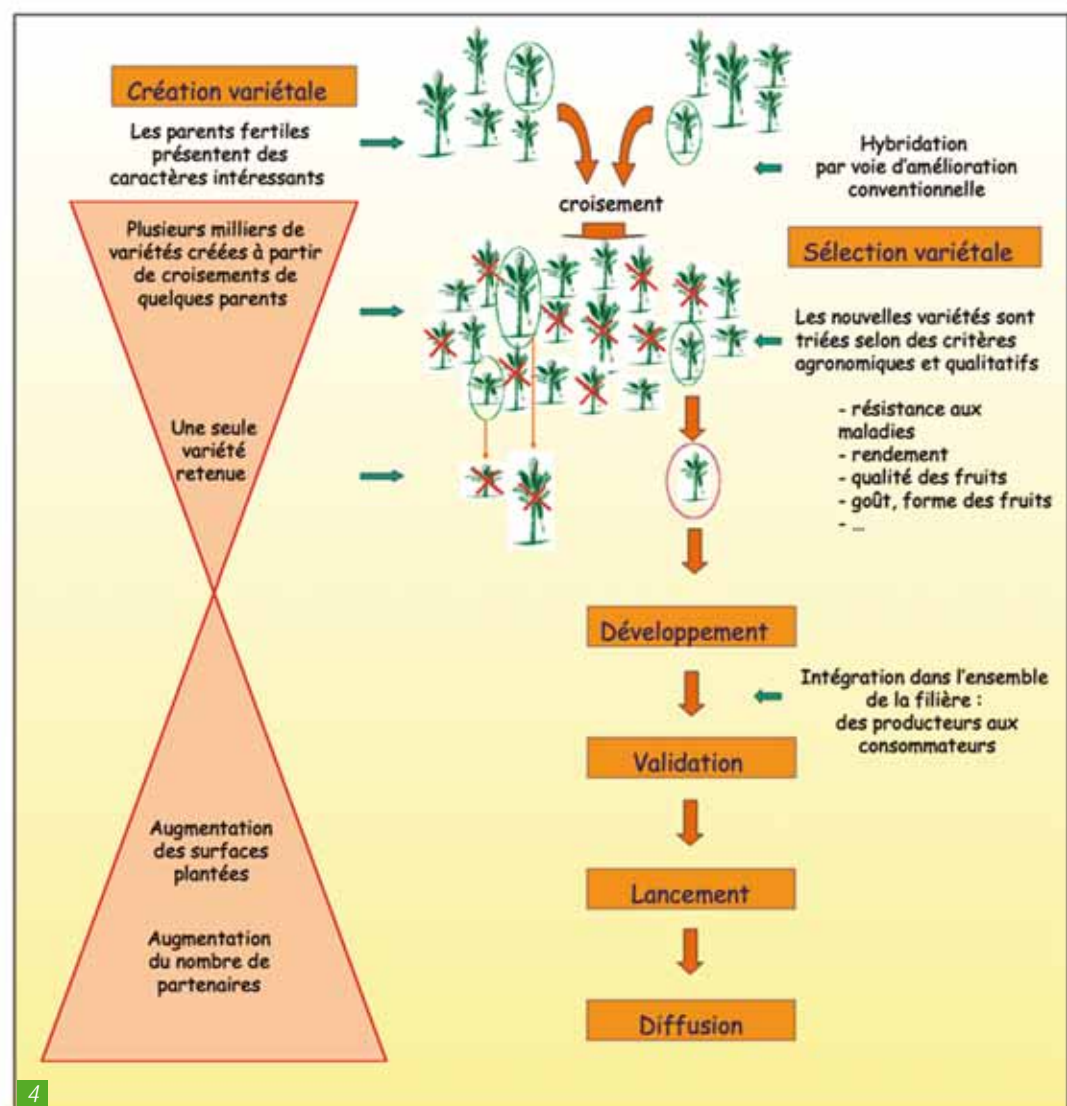


Figure 4 : schéma de création et de sélection d'une nouvelle variété de banane.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abadie C., Pignolet L., El Hadrami A., Habas R., Zapater M.F. and Carlier C., (2005), *Inoculation avec *Mycosphaerella sp.*, agent de cercosporioses, de fragments de feuilles de bananiers maintenus en survie* Cahier des Techniques de l'INRA ; Numéro spécial « Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs », p 131-134.

Chabrier C., Mauléon H., Bertrand P., Lassoudière A., and Quénéhervé P. (2005) *Banane antillaise, les systèmes de culture évoluent : en Martinique, méthodes alternatives pour réduire l'utilisation des nématocides et insecticides en bananeraies.* In : *Phytoma - La défense des végétaux n 584*, p. 12-16.

Fortune M.P., Gosine S., Chow S., Dilbar A., St. Hill A. Gibbs H. and Rambaran, (2005) *First report of black sigatoka disease (causal agent *Mycosphaerella fijinsis*) from Trinidad, Plant Pathology 54, 246.*

Jenny C., Tomekpe K, Bakry F., and Escalant J.V, (2004) *Revue des stratégies d'amélioration conventionnelle de Musa, InfoMusa, Vol.13 n°2, p.2-5.*

Loeillet D., (2002) *Le commerce européen de la banane et ses enjeux,* In : *Reunión de la*

une vingtaine d'années. Lors des premières hybridations, l'objectif principal était la résistance aux cercosporioses. Avec l'expérience et les enseignements tirés du développement des différents hybrides, nous avons intégré de nouveaux critères de sélection. Ainsi, la robustesse des plants, la tolérance aux nématodes, le goût, la forme, la couleur du fruit sont autant de caractéristiques maintenant prises en compte.

Le passage dans la filière de l'une de nos variétés a permis de considérer les contraintes des circuits de distribution, d'intégrer le mode de fonctionnement complexe de cette filière banane, avec ses contraintes inamovibles et ses possibilités d'adaptation et d'évolution. Nous avons aussi fait le tri parmi les géniteurs potentiels. Certains d'entre eux ont été écartés parce qu'ils portaient dans leur génome des virus intégrés, d'autres l'ont été parce qu'ils n'ont jamais donné de graines.

L'innovation variétale pour la banane est un processus continu. Encore beaucoup de combinaisons restent à explorer. Chaque année, de nouvelles combinaisons de géniteurs sont testées et de nouveaux hybrides rentrent dans le processus Vanouba.

D'autre part, certains croisements qui ont déjà donné des hybrides intéressants sont intensifiés, c'est-à-dire que le croisement est pratiqué plusieurs fois pour explorer au maximum la diversité créée. Plus on répète le croisement, plus on a de chances de tirer la meilleure combinaison génétique, associant les avantages apportés par les différents géniteurs.

PERSPECTIVES D'UTILISATION DES HYBRIDES DE BANANES

L'aboutissement à une variété commerciale répondant aux contraintes environnementales et commerciales n'est possible que si la sélection et l'évaluation se font par changements d'échelle successifs. Le positionnement de ces nouvelles variétés dans le paysage agricole antillais devra également se faire par étapes.

Les stratégies d'utilisation variétale pourront s'envisager à différents niveaux : la parcelle, le système d'exploitation ou/et le bassin versant. Dans l'immédiat, il paraît évident que certaines zones devront être prioritaires compte-tenu des contraintes spatiales liées à l'arrêté des 50 mètres. Mais, à terme, l'efficacité dans le contrôle des épidémies notamment de cercosporiose doit

être raisonnée en fonction de la dynamique et de la structuration des populations pathogènes.

Pour éviter le contournement trop rapide des résistances par les champignons, ou la sélection de certaines espèces de nématodes, des dispositifs en « patchwork » avec des zones refuges seront à privilégier. Il ne s'agit donc pas de remplacer l'ensemble de la bananeraie existante aujourd'hui en Cavendish par tel ou tel hybride, mais au contraire de proposer une mosaïque de solutions adaptées aux contraintes écologiques et économiques particulières de nos régions.

Les nouvelles variétés sont indissociables du développement de nouveaux systèmes de cultures visant un objectif "zéro pesticide". Le développement durable et raisonné de la culture de la banane passe par l'émergence de nouveaux types de marchés, permettant à chaque acteur de trouver la ou les solutions qui lui conviennent le mieux.

Les tentatives de segmentation sur le marché européen existent déjà mais ne concernent que des volumes très faibles (5 % du marché européen) relativement à la suprématie de la banane « dessert » standard. Ces tentatives sont récentes et peuvent être réparties en trois groupes (Loeillet, 2002).

On note la segmentation par produit avec le cas de la banane à cuire de type "plantain". Ce fruit plutôt consommé sous forme de légume est destiné à certains groupes ethniques, et les quantités importées en Europe restent inchangées depuis une dizaine d'années. Les autres cas de segmentation sont les bananes exotiques de couleur rouge/rose, les "figue-pomme" et les "Frayssinettes".

La consommation de ces bananes reste marginale et très spécifique (fêtes de fin d'année, circuits de distribution spécialisés) car le prix au détail est en général élevé.

La segmentation par mode de production est basée sur la même variété Cavendish, mais cette dernière est alors produite autrement. C'est l'image que les consommateurs achètent dans ce cas. Ainsi, la banane certifiée biologique est en progression constante, principalement en Suisse et dans les régions du Nord de l'Europe. La République Dominicaine, l'Equateur et le Pérou se sont emparés de ce marché. En Martinique, si elle se développait, la banane "bio"



asociación para la cooperación en investigación de banano en el Caribe y en América tropical (ACORBAT). Memorias XV reunión, p. 535-540.

Quénéhervé P., Marie-Luce S., Barout B. and Grosdemange F., (2005), Une technique de criblage variétal précoce des bananiers envers les nématodes phytoparasites, Nematology vol. 8(1), 147-152.

Salmon F., Abadie C., Bugaud C., Chillet M., Dorel M., Jenny C., Ri-sède J.-M., Teycheney P.-Y., and Cote F. (2005) Développement d'une variété de bananes : la Flhorban 920, Communication au 41^e congrès annuel de la Société Caraïbe pour les Plantes Alimentaires (10-16 juillet 2005, Le Gosier, Guadeloupe).

Figure 5 : nouvelle variété Flhorban 920 présentée en sachets.

serait cantonnée aux régions sèches du Sud, là où la pression parasitaire est relativement faible. Les bananes issues du commerce équitable (Fair Trade), quant à elles, sont présentes sur le marché européen mais ne sont pas adaptées aux conditions de production communautaire. On peut aussi citer la "banane de Montagne", développée en Guadeloupe, qui renvoie à une zone géographique de production très spécifique.

Enfin la segmentation de présentation différenciée est la plus forte : banane en sachet prépesé, bananes enfants avec des fruits de petite taille comme sur le marché anglais ou danois.

Les possibilités de segmentation qu'offrent les nouvelles variétés semblent adaptées aux conditions antillaises. Elles peuvent en effet se positionner dans les trois types de segmentation : par un mode de production plus respectueux de l'environnement, par des bananes différenciables par le goût et la forme, et par une mise en évidence dans les rayons, en sachets par exemple (cf. figure 5).

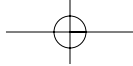
Ces segments de marché que peuvent ouvrir les nouvelles variétés permettraient de valoriser des produits spécifiques aux Antilles, afin de rester compétitifs au niveau du marché européen.

4

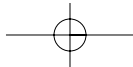
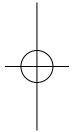
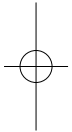
Cependant, cette démarche de diversification ne pourra aboutir qu'avec un réel intérêt des opérateurs en aval de la filière, notamment les



importateurs et les distributeurs. Grâce à une démarche commune et volontariste, de nouvelles variétés pourraient ainsi prendre une place importante sur le marché export.



4



Tixier P.
PRAM / Cirad,

Marie P.
PRAM / Cemagref,

Houdart M.
PRAM / Cirad.

Développer de nouveaux outils pour les problématiques agro-environnementales

Un des principaux enjeux de la recherche agronomique actuelle est de permettre aux exploitations agricoles d'atteindre les nouveaux objectifs environnementaux assignés par les réglementations nationale et européenne. Chercheurs et ingénieurs réfléchissent donc à de nouvelles pratiques agricoles qui assurent ces objectifs par une réduction significative des impacts polluants (système « zéro pesticide » par exemple). Néanmoins, cette aptitude des systèmes de culture à répondre à la contrainte environnementale fixée ne suffit pas. Pour que ces systèmes de culture soient performants, il faut également évaluer leur capacité d'adaptation et d'intégration aux pratiques et stratégies de l'exploitant.

Il s'agit donc, pour les acteurs de la recherche, de s'interroger à la fois sur

- 1- les performances environnementales des solutions proposées (en terme de réduction des impacts négatifs)
- 2- les critères de choix des exploitants agricoles (pour la mise en œuvre concrète de ces solutions).

En conséquence, deux thématiques distinctes mais corrélées sont étudiées (Figure 1) :

- 1 • comprendre l'ensemble des processus biologiques et physico-chimiques qui régissent la nature et l'intensité des impacts de l'agriculture sur l'environnement naturel, afin d'imaginer en retour des solutions techniques performantes,

- 2 • identifier les facteurs qui déterminent l'appropriation de nouveaux systèmes de culture ou de nouvelles pratiques par les exploitants. Ces facteurs ne sont pas forcément intrinsèques à l'exploitation, mais souvent relatifs à son environnement général, qu'il soit naturel (pression parasitaire), social (niveau de formation des professionnels) ou encore économique (dynamique des marchés agricoles).

Nous proposons d'aborder ces problématiques par trois contributions différentes, qui illustrent des travaux de recherche effectués au PRAM. Dans les deux premiers articles (P. Tixier et P. Marie), nous décrivons les méthodes utilisées pour évaluer les impacts agro-environnementaux, à l'échelle d'une parcelle voire d'une exploitation agricole pour le premier, à l'échelle d'un territoire côtier pour le second. Dans le troisième article (M. Houdart), nous nous intéressons en retour à la nature des facteurs internes et externes au monde agricole qui influencent les décisions des exploitants

Ce faisant, nous souhaitons insister sur la complexité d'une telle démarche, qui nécessite la prise en compte d'échelles d'étude spatiales et temporelles différentes, ainsi que l'agrégation de données aussi diverses qu'essentielles. Nous espérons ainsi clarifier auprès du lecteur le terme émergent d'agro-environnement.

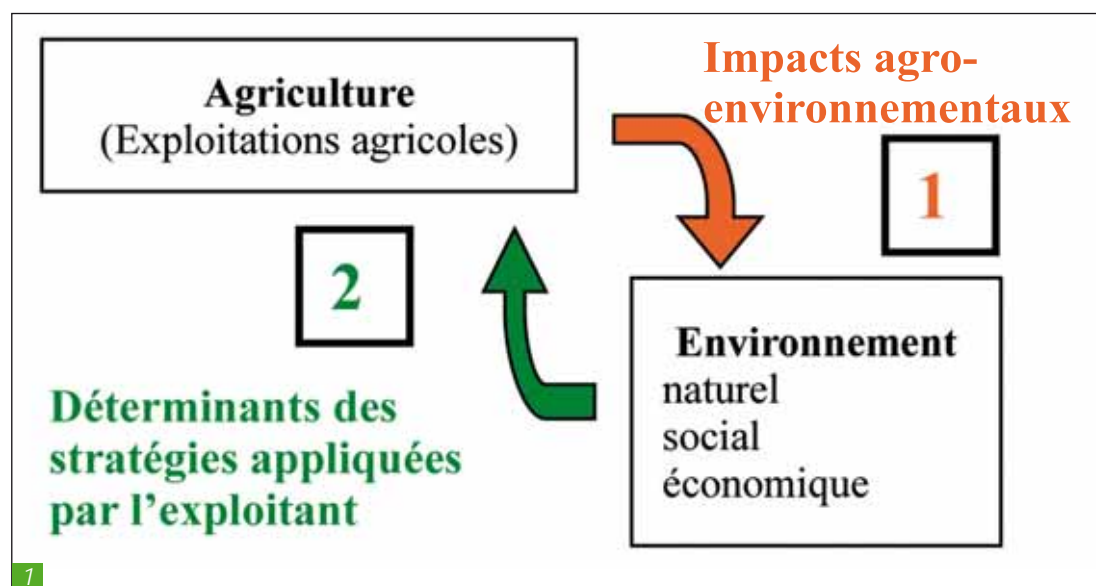


Figure 1 :
la double
problématique de
l'agro-environnement.

Tixier P.
PRAM / Cirad

• *Évaluation assistée par modèle des risques environnementaux à l'échelle de la parcelle : exemple des systèmes de culture à base de bananiers*

Aux Antilles françaises les systèmes de culture à base de bananiers résultent de l'interaction de différents facteurs : historiques, naturels, techniques, commerciaux, réglementaires et sociaux. Ces systèmes de cultures sont soumis à des contraintes fortes d'ordre technique, commercial et sociétal.

Dans ce contexte, des changements importants dans la manière de produire sont devenus nécessaires, notamment concernant l'emploi des produits phytosanitaires qui devra forcément être réduit.

Il y a actuellement, associés à cette production, des problèmes de durabilité agronomique (dûs au développement de parasites et à la détérioration des propriétés physiques et chimiques du sol) et de graves dégradations des milieux environnants avec notamment des problèmes de pollution de la ressource en eau par les produits phytosanitaires. La diversité des situations culturelles, aussi bien au niveau des pratiques que de l'hétérogénéité des sols et de la variabilité climatique, ne permet pas de fournir un constat global.

Face à des risques environnementaux importants déjà avérés, il est indispensable d'élaborer de nouvelles stratégies visant à les limiter. La mise en œuvre de rotations culturelles avec d'autres cultures comme la canne à sucre ou l'ananas, la mise en place de jachères, de travaux de préparation du sol adaptés, d'une gestion raisonnée du cycle de la culture et des produits phytosanitaires constituent quelques éléments clés de ces nouvelles stratégies. Il est néanmoins nécessaire de disposer de méthodes et d'outils pour évaluer les systèmes de culture existants ou innovants.

Une approche intégrée des agrosystèmes est fondamentale et les modèles de simulation représentent, de par leur nature prédictive, des outils privilégiés pour cela.

L'évaluation de la durabilité agronomique et environnementale des systèmes de culture constitue une composante fondamentale de la démarche de conception de systèmes de culture

performants et respectueux de l'environnement. Durant la dernière décennie, les méthodes d'évaluation des risques et des impacts environnementaux liés aux activités agricoles ont connu un intérêt croissant (Girardin et al., 2000). Bien que ces méthodes aient des objectifs souvent différents, elles sont caractérisées par une approche écologique commune des processus et par une évaluation des risques environnementaux réalisée à l'échelle de la parcelle. Il est possible de définir un grand nombre d'impacts potentiels des agrosystèmes sur l'environnement, notamment sur les ressources en eaux de surface et souterraine, sur le sol ou sur les biocénoses des écosystèmes naturels.

L'évaluation de l'impact environnemental des systèmes de culture doit prendre en compte non seulement la diversité des facteurs qui entrent en jeu (climat, pédologie, pratiques, etc), mais également les interactions entre ces facteurs, relations qui sont variables au cours du temps.

Rendre compte de l'ensemble des mécanismes nécessite donc des formalismes mathématiques puissants et des méthodologies d'intégration et de hiérarchisation adaptées. Ainsi est-il primordial de disposer d'outils performants qui puissent intégrer la complexité des informations nécessaires. Le recours à la modélisation est de plus en plus fréquent, notamment avec des modèles de simulation. Grâce à leur capacité prédictive, ces derniers permettent de comparer les performances environnementales de différents systèmes de culture, existants ou innovants, dans les conditions pédoclimatiques et parasitaires données, et sur des pas de temps modulables.

La figure 1 présente la structure générale du cadre de modélisation qui a été développé pour les systèmes de culture bananiers. Le modèle SIMBA (Tixier, 2004) modélise les différents compartiments biologiques et physiques de l'agrosystème *via* des modules de simulation en interaction.

Les modules biophysiques simulent le fonctionnement de l'agrosystème et des indicateurs caractérisent les risques agro-environnementaux associés aux systèmes simulés.



Le modèle SIMBA, en fournissant des sorties agronomiques, environnementales et économiques (marge brute), permet l'évaluation multicritère de systèmes de culture simulés selon plusieurs points de vue.

UN MODÈLE DE SIMULATION DU FONCTIONNEMENT BIOPHYSIQUE DE L'AGROSYSTÈME

L'évaluation et la conception de systèmes de culture innovants et durables nécessitent l'utilisation d'outils de modélisations spécifiques qui rendent compte des caractéristiques particulières du système. Les modules biophysiques de SIMBA sont adaptés au contexte des systèmes de culture à base de bananiers aux Antilles. La simulation à l'échelle de la parcelle de ces processus est centrée autour de la prise en compte de l'évolution de la structure du peuplement de bananiers au cours des cycles de culture. Ce point clé conditionne l'ensemble de la dynamique du système et notamment la composante parasitaire qui influe sur la pérennité de la bananeraie et qui conduit à l'emploi des produits phytosanitaires. Le parasitisme des nématodes phytoparasites est simulé en interaction avec la croissance et la structure du peuplement de bananiers, l'état du sol et l'emploi de nématicides. SIMBA modélise également la croissance des bananiers et leur productivité, la structure du sol, la couverture du sol et le bilan hydrique. Les pratiques culturales sont prises en compte à travers des règles de décision. Il est ainsi possible d'évaluer des scénarii de système de culture existants ou innovants.

DES INDICATEURS D'ÉVALUATION DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

En complément des modules de simulation biophysique de SIMBA, des indicateurs environnementaux permettent d'évaluer les risques associés aux systèmes simulés.

Un indicateur est une variable mesurée ou calculée qui traduit l'intensité d'un phénomène ou une caractéristique d'état du système. Il existe différents types d'indicateurs, les plus élémentaires sont de simples mesures et les plus complexes comprennent l'intégration de plusieurs variables. Pour construire un indicateur intégré, la première étape consiste à définir un jeu de variables représentatives du phénomène devant être évalué. Ces variables peuvent être mesurées, estimées ou simulées. L'agrégation

des variables peut-être réalisée selon différentes méthodes (Van der Werf et Petit, 2002) ; cela peut être de simples moyennes arithmétiques ou des algorithmes faisant appel à des systèmes experts ou à l'intelligence artificielle.

Il est possible de définir deux grandes catégories d'indicateurs liés à l'agro-environnement : indicateurs d'impact et indicateurs de risque. Ces différentes catégories d'indicateurs environnementaux sont utilisées aussi bien pour le pilotage des systèmes que pour leur labellisation ou encore comme outils d'analyse des politiques.

Les indicateurs d'évaluation des risques environnementaux permettent :

- d'évaluer les phénomènes non modélisables,
- de systématiser la connaissance experte

Les risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et les risques d'érosion sont souvent innérants aux systèmes de culture bananiers. Deux indicateurs ont été développés en vue d'évaluer ces risques, mobilisant des méthodologies similaires à la méthode INDIGO développée par l'INRA Colmar (équipe "Agriculture durable" UMR Nancy-Colmar). La méthode INDIGO présente l'avantage de prendre en compte la connaissance des experts et permet l'agrégation de nombreuses variables.

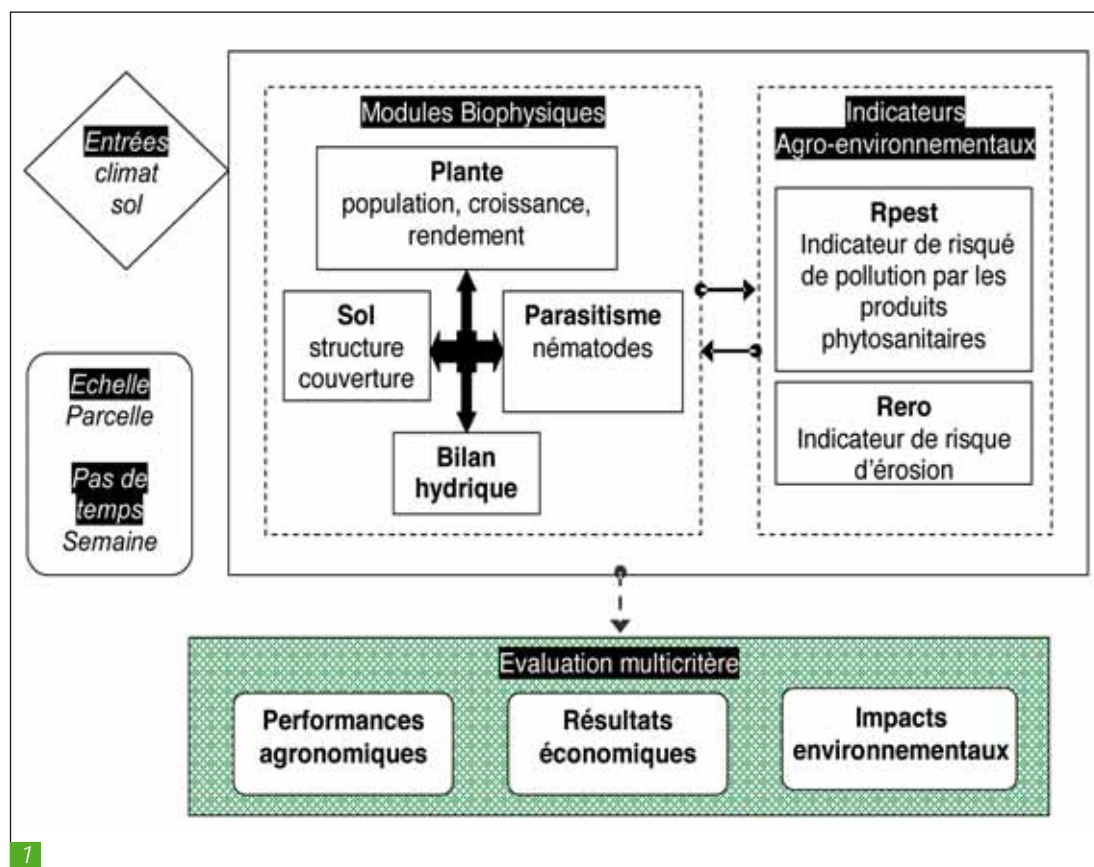
La méthode d'agrégation est basée sur un système expert et utilise la logique floue (méthode SELF). Les indicateurs développés dans SIMBA, prennent en compte les spécificités du contexte physique des Antilles et évaluent le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et le risque d'érosion.

Rpest un indicateur de risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires

Depuis de nombreuses années le problème de l'exposition de l'environnement aux produits phytosanitaires est posé au centre de la problématique du développement de systèmes de culture plus durables. Un indicateur appelé Rpest a été construit, il permet l'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines par les produits phytosanitaires.

Cet indicateur, couplé avec le modèle SIMBA, utilise des sorties biophysiques de celui-ci. Rpest évalue les risques de pollution des eaux de surface ou souterraines de manière séparée ou

Figure 1 :
structure générale
du modèle SIMBA
et lien avec les
indicateurs de risques
environnementaux
Rpest et Rero.



de manière globalisée. La spécificité de cet indicateur est qu'il est calculé au pas de temps hebdomadaire. Il permet ainsi une évaluation dynamique du risque de pollution au cours du temps et donc d'identifier les périodes à risques.

Une note moyenne ou une répartition des notes par classe sur l'ensemble de la période évaluée est également calculée.

Rero un Indicateur d'évaluation du risque d'érosion

Le risque d'érosion est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction entre les caractéristiques locales d'état du milieu et le climat auquel ce milieu est soumis. Sur les andosols (sols volcaniques), le ruissellement est généré par une saturation progressive du profil lorsque la pluviométrie excède la capacité d'infiltration des horizons les moins perméables et non à cause d'un colmatage de la porosité superficielle par battance.

L'érosion sur ces sols est principalement due au déplacement sur des courtes distances de particules de sol agrégées. Le travail du sol, la mécanisation ainsi que les cycles d'humectation et de dessiccation permettent d'expliquer la

génération d'agrégats susceptibles de se déplacer. La modélisation du phénomène d'érosion dans de tels systèmes n'a pas donné de résultats très satisfaisants.

Comme Rpest, Rero est un indicateur calculé soit au pas de temps hebdomadaire, afin d'identifier précisément les périodes de risques, soit de manière intégrée sur l'ensemble de la période évaluée (moyenne des notes ou répartition des notes par classe).

EXEMPLES D'ÉVALUATIONS AGRO-ENVIRONNEMENTALES

Cet outil fournit un tableau de bord d'évaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture simulés. La figure 2 présente un exemple d'évaluation multicritères de deux systèmes de culture par le modèle SIMBA. Les systèmes simulés sont un système intensif classique basé sur une monoculture utilisant une lutte chimique intensive et un système plus extensif basé sur des rotations culturales et l'utilisation modérée des intrants chimiques. Cette approche permet de comparer des systèmes de culture différents dans des conditions de sol et de climat iden-



Figure 2 :
tableau de bord
agro-environmental
simplifié de SIMBA
pour deux systèmes
de culture à base de
bananiers.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Girardin, P., Bockstaller, C., Van der Werf, H., 2000.

Assessment of potential impact of agricultural practices on the environment: the AGRO*ECO method. Environmental Impact Assessment Review. 20, 227-239.

Tixier, P., 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de cultures durables, application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 233p.

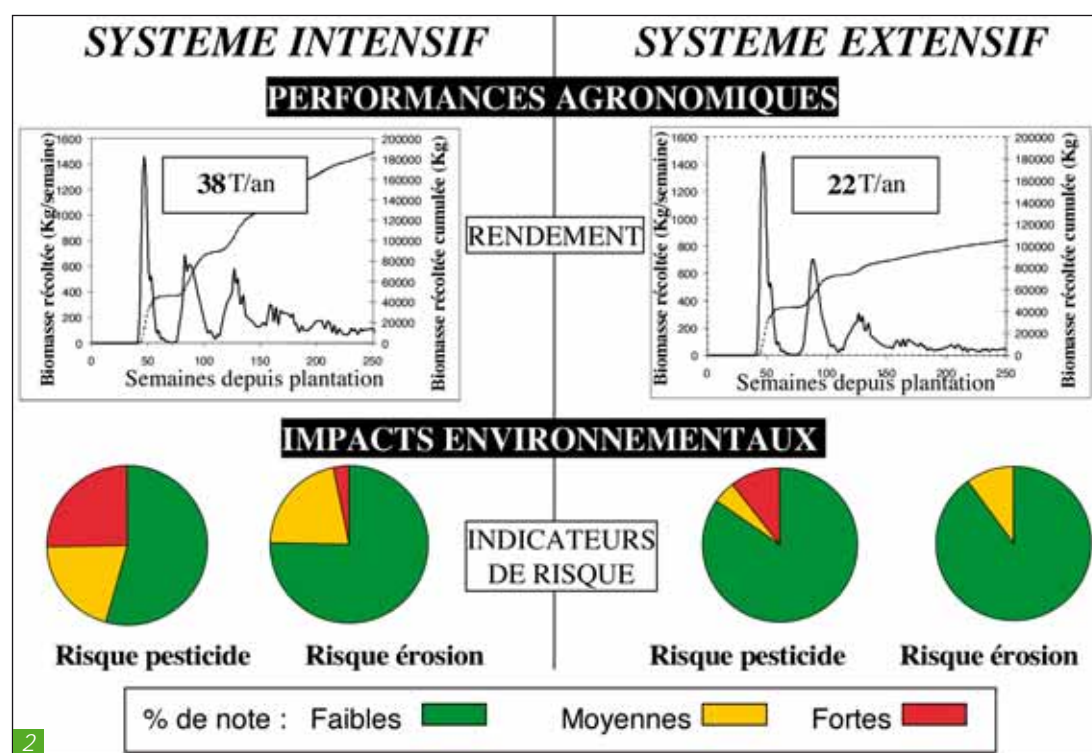
Van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. Agric. Ecosyst. Environ. 93, 131-145.

tiques. C'est donc un outil puissant pour comparer des systèmes, pour s'abstraire des variations du milieu réel et pour orienter les recherches et les expérimentations devant être menées.

Au-delà de cette utilisation comme outil d'évaluation, SIMBA permet de rechercher des combinaisons optimales de pratiques culturales dans un contexte et pour un objectif donné. L'utilisation de SIMBA a ainsi déjà permis de définir certaines options stratégiques qui devront être testées en conditions réelles.

que les modèles peuvent fournir des variables de description du système simulé à des pas de temps beaucoup plus fins que des mesures biophysiques au champ le permettraient. Ces variables peuvent servir à l'évaluation des risques environnementaux au même pas de temps.

L'échelle de la parcelle est une échelle pertinente pour évaluer les systèmes de culture, notamment les interactions entre système décisionnel de l'agriculteur et le milieu physique.



CONCLUSION

L'approche double de modélisation et d'évaluation par indicateur que nous avons choisie ouvre des perspectives intéressantes ; elle permet :

- de souligner l'interrelation qui peut exister entre indicateurs,
- de prendre en compte le rendement,
- d'avoir une capacité prévisionnelle (utile dans une démarche de conception de systèmes durables),
- d'aider à l'identification des variables critiques,
- de constituer un outil d'intégration des connaissances, et
- de donner à l'évaluation un aspect dynamique.

L'idée maîtresse de l'évaluation dynamique est

De plus, la compréhension des mécanismes impliqués dans les atteintes est un pré-requis pour pouvoir traiter des échelles plus larges telles que l'exploitation agricole, le bassin versant (cf. article de P. Marie) ou le territoire (cf. article de M. Houdart).

Marie P.
PRAM / Cemagref.

• *Evaluer les risques agro-environnementaux à l'échelle de territoires : Diagnostic de l'érosion hydrique des sols agricoles sur le bassin versant de la baie du Robert*

Les méthodologies d'évaluation des impacts agricoles sur l'environnement sont dépendantes du type d'impact que l'on étudie. En outre, la délimitation des zones considérées comme dégradées par une pollution d'origine agricole ou anthropique, et donc le choix de l'échelle d'étude, influencent les méthodes et outils utilisés pour la mise en place du diagnostic.

L'article précédent présente l'évaluation des risques agro-environnementaux à l'échelle d'une parcelle agricole, en l'occurrence une plantation de bananes. On constate qu'à cette échelle qui permet l'obtention de résultats précis, l'objectif est d'identifier les systèmes de culture performants, qui pourront être adoptés par la profession. Or, la performance d'un système de culture résulte d'un compromis délicat à estimer : rendement agronomique optimal, coûts de production réduits, qualités idéales des productions, impacts négatifs sur l'environnement minimisés ; le recours à la modélisation devient donc incontournable.

Néanmoins, la pertinence des modèles est fortement liée au choix et à la précision des variables d'entrée. A l'échelle parcellaire, les données d'entrée peuvent être fournies en nombre suffisant. Mais qu'advient-il si l'impact environnemental est étudié sur des territoires beaucoup plus vastes ?

Les politiques agricoles et environnementales actuelles se raisonnent en effet de plus en plus à l'échelle de « territoires ». Or, un territoire est défini par ses acteurs (types d'acteurs, interactions entre ces derniers) et la nature de leurs enjeux communs. Dans le cas d'une pollution de rivière, le territoire dit « à enjeu » correspondra donc à l'aire géographique influençant cette pollution, c'est-à-dire le bassin versant.

La présente contribution a pour objectif de présenter les étapes de construction d'outils de diagnostic à l'échelle d'un territoire à enjeu environnemental, en prenant pour exemple le diagnostic réalisé par le Pôle de Recherche Agro-environnemental de la Martinique (PRAM) et ses partenaires sur l'envasement de la baie du Robert.

L'ENVASEMENT DE LA BAIE DU ROBERT EST LIÉ À L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT

Présentation de la zone d'étude

La baie de la commune du Robert, située sur la façade atlantique de la Martinique, constitue un plan d'eau semi-fermé de 6,5 km de long et 3 km de large. Elle est parsemée d'herbiers, de mangroves et de petits récifs. Cette diversité de biotopes et d'écosystèmes lui confère ainsi un rôle de nourricerie pour de nombreuses espèces halieutiques telles que la langouste royale (*Panulirus argus*), l'oursin (*Tripneustes ventricosus*) et des espèces de poissons de récifs.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études ponctuelles ont montré que ces écosystèmes présentaient des signes de dégradation liés à un phénomène combiné d'eutrophisation et d'envasement. L'agriculture, le développement urbain et les rejets d'eaux usées sont identifiés comme les causes principales, même si d'autres pressions marines sont susceptibles de l'aggraver : la surpêche, la fréquentation touristique des îlets ou encore l'aquaculture.

Cette baie est ceinturée par un bassin versant de 23 km² sur lequel on trouve les principaux types d'occupation des sols : de l'agriculture (élevage, canne à sucre et banane), un habitat concentré au niveau du bourg (14 % des logements) mais essentiellement diffus sur les mornes du bassin, et un pôle d'activités industrielles, artisanales et portuaires en bordure littorale. En sortie de baie, le renouvellement des eaux lié aux effets conjugués des marées et des alizés est limité par la faible largeur de la passe. Ces caractéristiques en font donc un site propice à l'étude des impacts anthropiques sur les ressources vivantes du milieu marin côtier.

L'envasement de la baie : un impact marin lié aux activités terrestres

L'envasement des baies abritées est un phénomène naturel lié aux apports de particules solides issues de l'érosion hydrique des bassins versants et à un faible hydrodynamisme qui



permet la sédimentation. Son accélération dans la baie du Robert au cours de cette dernière décennie est évidente et s'explique par des activités anthropiques croissantes. Les conséquences sont que le fond de la baie s'envase et que la turbidité des eaux augmente. Cela se traduit par une réduction considérable des espaces colonisés par les herbiers de phanérogames.

Afin de limiter les impacts de l'érosion des sols sur le milieu marin récepteur, le PRAM s'est associé à l'Ifremer, à l'Université des Antilles et de la Guyane et à la commune du Robert pour mettre en place un diagnostic global. L'objectif est d'analyser à l'échelle du territoire (ici le bassin versant de la baie) les principaux processus qui déterminent la perte en terre des sols, et d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion.

LA CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DE SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION

Le diagnostic idéal serait une évaluation quantitative fine des émissions de particules solides en chaque point du bassin versant. Or, à l'échelle d'un territoire de ce type, on se trouve en présence d'une forte hétérogénéité naturelle et anthropique qui rend utopique cette proposition. La superficie du territoire concerné, ses variabilités topographique et pédologique et la diversité des activités et des usages du sol rendent complexe la caractérisation des processus en jeu sur la totalité de la zone considérée.

Dans notre exemple, les ingénieurs du PRAM cherchent donc à construire une représentation du bassin, simplifiée mais cohérente, qui permette d'identifier sur l'ensemble de ce territoire les zones les plus sensibles à l'érosion (et potentiellement les plus productives en sédiments) qui mériteraient des analyses quantitatives plus précises. Ce principe de modélisation, qui découpe le bassin versant en unités géographiques homogènes vis-à-vis d'un enjeu donné (ici la perte en terre) se base sur la définition d'un indicateur.

La première étape consiste à référencer les principaux facteurs explicatifs de l'érosion des sols sur le bassin versant. Quatre variables sont identifiées :

- l'occupation des sols : c'est une variable fondamentale puisqu'elle peut exprimer le degré de protection des sols contre les phénomènes érosifs. Pour

une zone considérée, l'occupation se traduit notamment par le pourcentage de couverture du sol par la végétation ou liée à des actions anthropiques (urbanisation, pratiques agricoles, etc.) ;

- la topographie du bassin : elle influence l'intensité du phénomène, par la pente ;
- la situation amont/aval du sol étudié : mesurée par la "longueur de pente", elle permet de souligner la sensibilité d'un sol situé en aval, soumis à des écoulements plus concentrés et donc plus érosifs ;
- la pédologie : la nature même des sols détermine la sensibilité de ces derniers à l'érosion.

Une fois ces facteurs identifiés, la construction d'un indice de sensibilité du sol à l'érosion est proposée (Pinte, 2006). Différentes méthodes d'agrégation des facteurs existent (l'arborescence logique, l'analyse multicritères, l'expertise). Toutes ont pour objectif de subdiviser le bassin versant en grands ensembles, classés les uns par rapport aux autres selon l'impact environnemental choisi.

Nous avons adapté la méthode de l'arborescence logique (Le Bissonnais, 2002) à notre contexte local. Basée sur les connaissances de terrain et l'expertise scientifique, cette méthode se construit ainsi :

- 1 - Pour chacune des quatre variables précédemment listées, on définit des classes en nombre limité. Par exemple, pour la variable "Occupation du sol", 10 classes représentant la diversité spatiale du bassin sont proposées : habitat diffus, forêt, savane, canne à sucre, maraîchage, banane, etc.
- 2 - On identifie ensuite les combinaisons possibles entre chaque variable. Une combinaison fait donc référence à un jeu de quatre classes (une classe par variable). Ainsi, si 10 classes sont proposées pour chacune des 4 variables retenues, nous obtenons 10^4 possibilités. Ce chiffre est réduit par le nombre prédéfini de classes (2 à 4 classes seulement pour certaines variables) et par l'élimination de combi-

naisons inexistantes (pas d'agriculture sur les sols très pentus, pas de surfaces imperméabilisées sur les crêtes, etc).

3 - Au final, l'arborescence fournit toutes les situations possibles (Figure 1). Le recours à l'expertise et à la connaissance du terrain

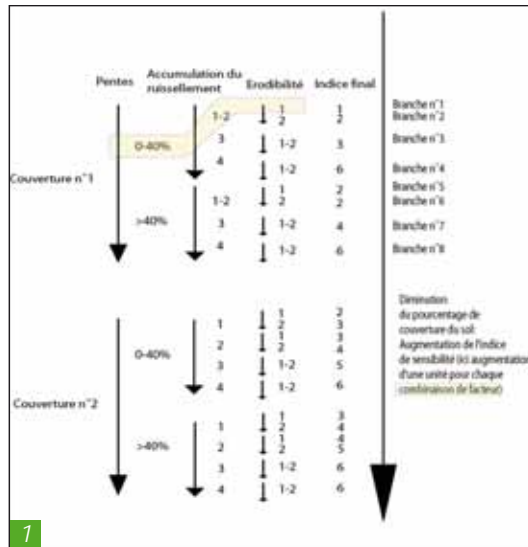


Figure 1 : schématisation de la construction de l'arborescence logique.

permet *in fine* la fusion de ces situations en sept catégories différentes, qui représentent l'indice de sensibilité des sols à l'érosion du bassin versant.

La figure 2 montre le résultat cartographique de cette première analyse. L'indicateur met en évidence deux points essentiels :

- la sensibilité des sols du bassin versant

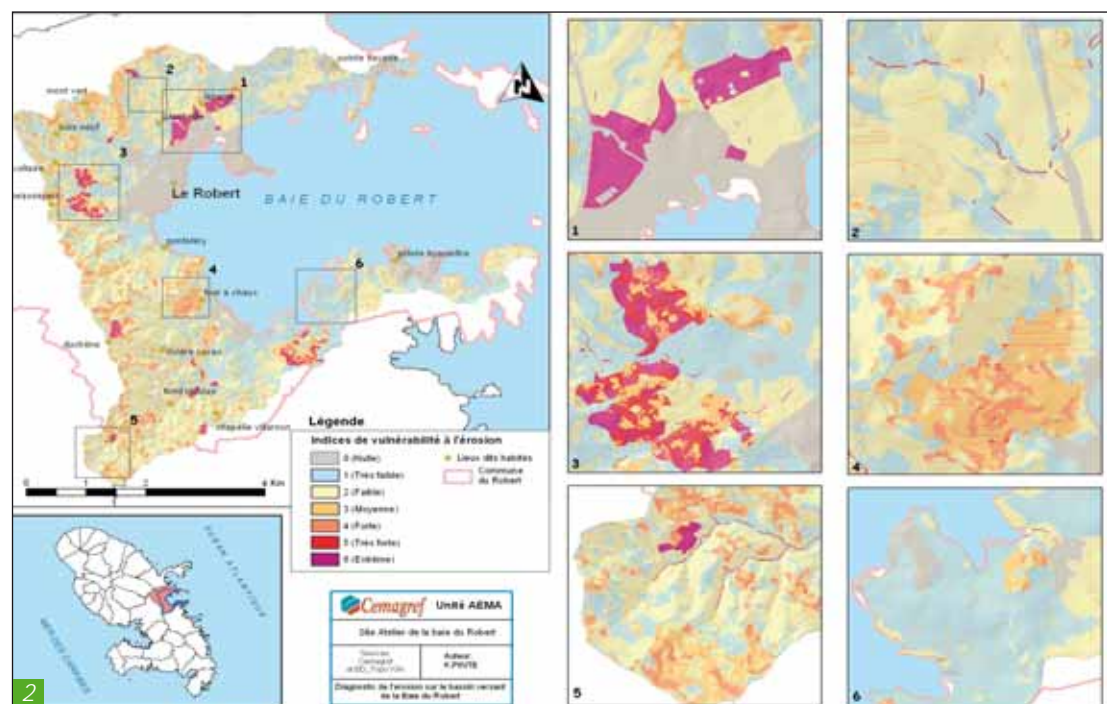


Figure 2 : Vulnérabilité à l'érosion sur le bassin versant et détails.

est ciblée. Seulement 7 % de la superficie totale est classée sensible à très sensible. L'hypothèse qui en découle est la suivante : l'envasement de la baie est la conséquence de processus érosifs intenses mais spatialement limités ;

- les parcelles de banane ainsi que les zones temporaires de travaux constituent les principales occupations considérées sur le bassin comme les plus sensibles.

Cette première partie permet donc de cibler les espaces sur lesquels le diagnostic mérite d'être poursuivi.

La seconde partie présente les suites de ce travail sur un sous bassin versant, celui de la rivière Mansarde (encadré n°3 sur la Figure2).

LA PRÉCISION DE L'ANALYSE SUR LES ZONES IDENTIFIÉES COMME LES PLUS SENSIBLES

Si le modèle développé à l'échelle du bassin versant a permis de localiser les phénomènes érosifs sur des bananeraies notamment, le diagnostic est incomplet.

En effet, en matière d'aide à la décision, deux problématiques restent à étudier :



- 1 - Quelle est l'influence des terres situées en amont des parcelles agricoles sur le déclenchement de l'érosion ?
- 2 - Les terres effectivement érodées sont-elles transportées jusqu'au milieu marin, siège de notre enjeu environnemental ?

Le bassin versant de la rivière Mansarde est considéré par l'indicateur comme une zone très sensible aux phénomènes érosifs.

On constate en effet sur le terrain la présence de bananeraies sur lesquelles des signes d'érosion sont mis en évidence : de larges ravines creusées lors des événements pluvieux traversent les parcelles, des pertes en terre sont repérées par l'existence de micro demoiselles coiffées qui témoignent d'une érosion en nappe conséquente (photos 1 et 2).



*Photo 1 :
ravine dans une
bananeraie.*

*Photo 2 :
Micro demoiselles
coiffées.*

Pour répondre aux deux questions, la réduction de la zone d'étude permet une approche de terrain plus complète.

Le travail mené sur ce sous bassin consiste à représenter les voies d'écoulement superficielles, à la fois émettrices de particules (par ruissellement sur le sol) et vectrices de la pollution.

En identifiant précisément le réseau hydrologique actuel, façonné par la topographie et

certaines aménagements anthropiques (ravines, rivières, traces, réseau routier, etc), on est ainsi en mesure d'évaluer non seulement l'origine amont des flux d'eau qui circulent sur les parcelles, mais aussi la possibilité pour les particules solides d'atteindre en aval le milieu marin.

On pourra ainsi faire la différence entre deux parcelles de même sensibilité à l'érosion, l'une étant située aux abords d'un cours d'eau, l'autre au-dessus d'une zone de dépôt.

Du point de vue agricole, elles représentent le même risque, mais du point de vue environnemental, leurs impacts sont nettement différents.

Au final, il ressort les constats suivants :

Les parcelles agricoles, sensibles à l'érosion de leurs sols, reçoivent des écoulements superficiels



des terres amont, concentrés par les aménagements (déviations des eaux pluviales du réseau routier, concentration des flux d'eau domestiques des habitations de crête).

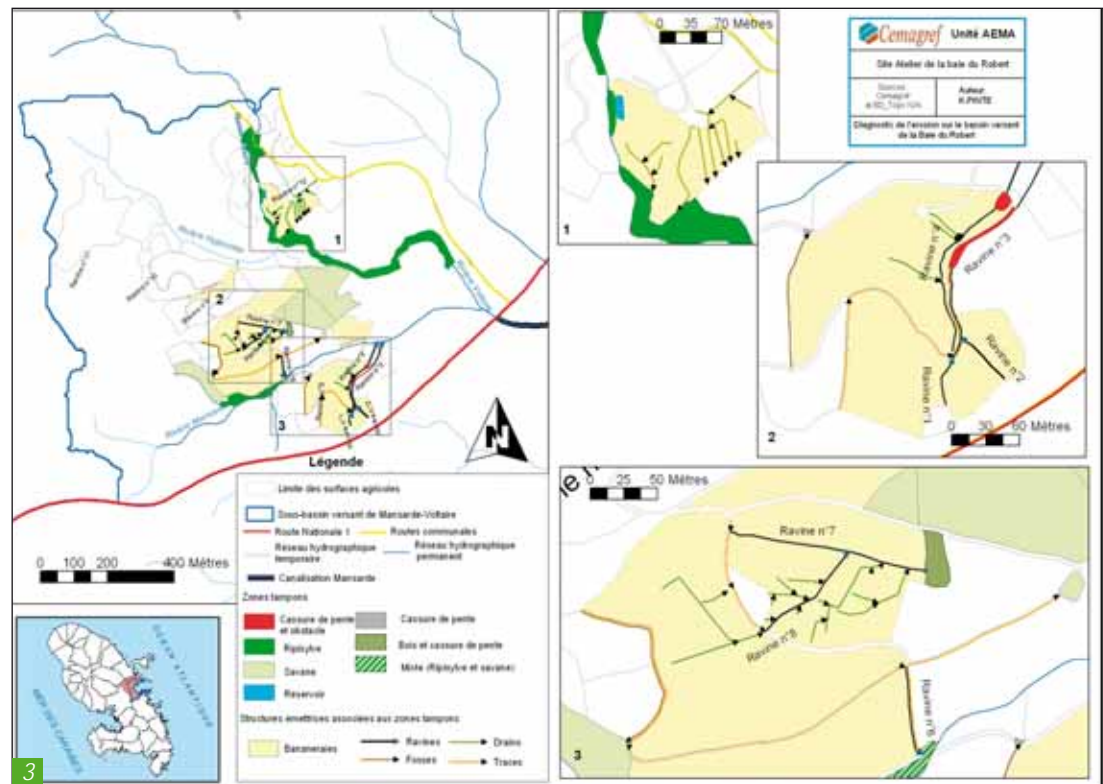
En hivernage, les eaux pluviales alimentent ces flux, permettant la formation de ravines entre les rangs de banane.

En aval, la connexité des parcelles au réseau principal diverge.

Certaines parcelles sont directement connectées, alors que d'autres bénéficient d'une zone tampon (savane, zone enherbée en rupture de pente) qui retient les sédiments (Figure 3).

Néanmoins, compte tenu de l'intensité des pluies sous climat tropical, ces particules sédimentées sont le plus souvent reprises et transportées à nouveau par une crue plus importante, et atteignent in fine l'exutoire côtier.

Figure 3 :
zones tampons
répertoriées et structures
émettrices associées.



CONCLUSION

A l'échelle de territoires à enjeu, qui ne permettent pas une analyse poussée sur l'ensemble du site, l'évaluation des impacts agro-environnementaux s'opère d'abord par une réduction de la zone d'étude. Cibler les zones à risque est une étape transitoire mais essentielle au diagnostic général.

Par la suite, la démarche consiste à développer des méthodes adaptées aux problématiques étudiées. Dans notre cas, si la source de l'enjeu est terrestre, l'impact est marin.

La notion de transport et de spatialisation des activités est donc primordiale et se traduit par l'évaluation de la connectivité des parcelles agricoles au réseau hydrologique de surface.

Ce diagnostic territorial doit néanmoins se poursuivre. En effet, il est peu fait allusion à l'aléa climatique (la pluie), condition pourtant sine qua non au déclenchement de l'érosion.

En effet, si l'on reprend deux parcelles identiques en terme de sensibilité à l'érosion et de connectivité, il suffira qu'une parcelle soit plus exposée aux pluies intenses que la seconde pour que, à nouveau, leurs impacts environnementaux divergent.

Toutes ces méthodes doivent s'appuyer sur une validation sur le terrain. Une batterie d'hypothèses et de simplifications accompagne en effet indicateurs et modèles, et il est primordial d'insister sur le champ de validité des résultats associés. Dans cet exemple, l'indicateur n'exprime en rien la quantité de terre réellement exportée vers le milieu marin.

Il présente en revanche l'intérêt de pré-flécher les zones sur lesquelles les premières actions auraient avantage à être ciblées (avec par exemple l'utilisation du modèle SIMBA sur les parcelles de banane classées comme très sensibles à l'érosion).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Le Bissonais, Y. et al. (2002). *L'érosion hydrique des sols en France. Rapport IFEN*. 106 p.

Marie, P., Lucas, G. (2005). *Etude spatiale des risques agro-environnementaux. Bassin versant de la baie du Robert. Rapport intermédiaire. MEDD*. 60 p.

Pinte, K., (2006). *Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert. Rapport de stage. Cemagref/INA P-G*. 184 p.



Houdart M.
PRAM / Cirad.

• *Rendre compte des impacts de l'environnement sur l'agriculture : les apports des systèmes multi-agents*

Pour modifier les systèmes de culture à fort niveau d'intrants (cf article P. Tixier), il est essentiel de comprendre ce qui incite les agriculteurs à les mettre en œuvre. Or, avec la diversification des fonctions assignées aux exploitations agricoles (production, mais aussi environnement, paysage, maintien du tissu social), les choix des exploitants ne dépendent plus seulement des contraintes et atouts de leur exploitation.

Ces choix dépendent désormais plus fortement que par le passé des relations qu'ils entretiennent avec d'autres exploitations ; des orientations politiques prises à l'échelle d'une région pour réguler le foncier par exemple, ou sortir une petite région agricole de son isolement économique ; des réglementations environnementales imposées à l'échelle d'un bassin versant ou en lien avec les distances aux cours d'eau (cf. article de P. Marie).

Se pose alors la question suivante : comment prendre en compte tous ces niveaux d'organisation, pour identifier le déterminisme du choix de systèmes de culture et, à partir de là, sur les pratiques phytosanitaires et l'environnement ?

L'un des objectifs du travail présenté consistait à trouver une méthode à même de rendre compte de l'effet conjugué de déterminants à différentes échelles (parcelle, exploitation, bassin versant, territoire rural) dans l'évolution d'un problème de pollution des eaux par les pesticides.

A été retenue pour cette étude la zone de la rive gauche de la Capot, située dans le Nord de la Martinique et caractérisée par l'enjeu de diminution de pollution des eaux par les pesticides (CIRAD, 2004).

Les analyses spatiales et statistiques permettent d'identifier les déterminants majeurs, directs et indirects des pratiques phytosanitaires. Nous avons souhaité tester la modélisation multi-agents pour simuler l'action conjointe de ces déterminants dans le temps. L'objectif de cet article est de présenter les apports de la simulation multi-agents pour la prise en compte de différentes échelles spatiales dans l'analyse de la relation entre activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides.

LE BASSIN VERSANT DE LA CAPOT : DU TRAVAIL DE TERRAIN AUX PREMIÈRES ANALYSES

L'étude menée sur le bassin versant de la rivière Capot (Houdart, 2005) repose sur le traitement d'enquêtes menées auprès de 46 exploitants installés entre Morne Rouge et Ajoupa Bouillon et s'intéresse plus particulièrement aux déterminants des pratiques phytosanitaires des exploitants agricoles.

L'ensemble des données recueillies, concernant les pratiques et leurs déterminants a été intégré dans un Système d'Information Géographique (Houdart, 2004).

Des analyses spatiales et statistiques ont permis d'exprimer la part explicative de plusieurs facteurs dans la variabilité spatiale des pratiques phytosanitaires, exprimées par un indicateur (IcP), calculé à la parcelle.

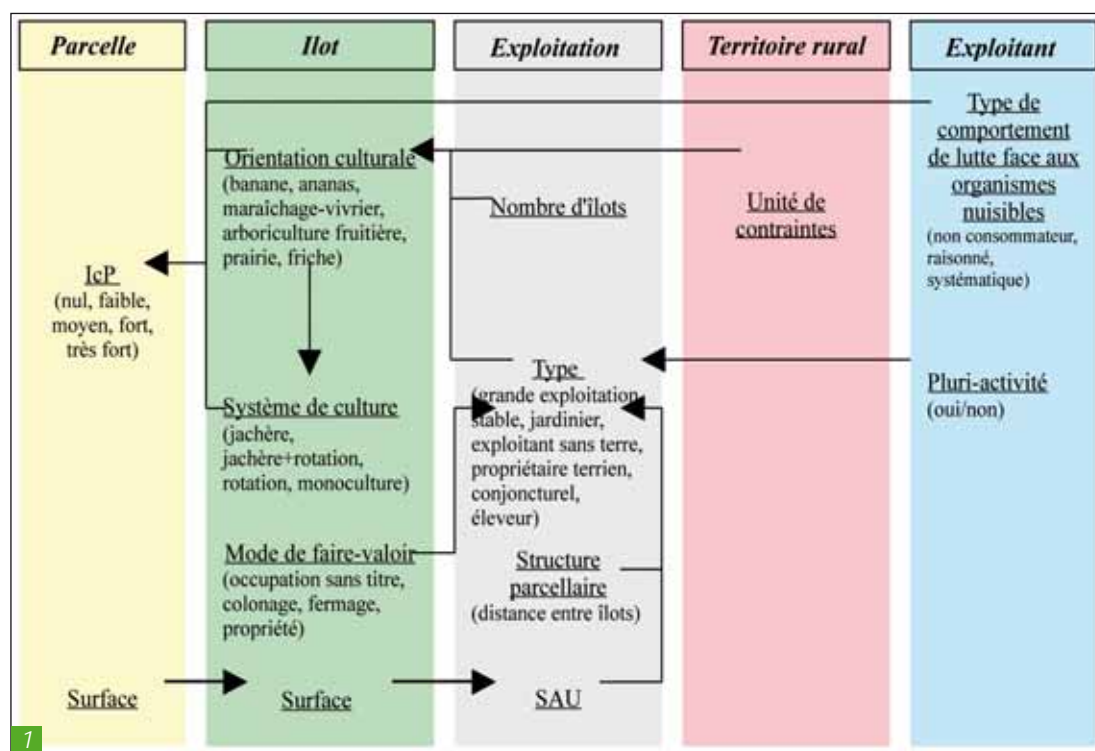
Il est ressorti de ces analyses que la variabilité spatiale et quantitative de l'IcP dépendait, directement ou indirectement (figure 1) :

- au niveau de l'îlot, de l'orientation culturelle, du système de culture, du mode de faire-valoir et de la surface ;
- au niveau de l'exploitation, du nombre d'îlots, du type d'exploitation, de la structure du parcellaire et de la Surface Agricole Utile (SAU) ;
- au niveau de l'ensemble du territoire rural étudié, des unités de contraintes (issues d'un zonage intégrant les contraintes topographiques, topologiques, climatiques, foncières) ;
- des variables propres à chaque exploitant qui entrent également en jeu : comportement de lutte face aux organismes nuisibles et pluri-activité.

C'est sur la base des connaissances que nous avons du fonctionnement du système rural compris entre Morne Rouge et Ajoupa Bouillon, tel que formalisé ci-dessus, que nous avons pu engager l'élaboration d'un système multi-agents.

Figure 1 :
déterminants de l'IcP
à plusieurs échelles
spatiales.

¹ Le logiciel
multi-agents
est disponible
gratuitement sur le site
<http://cormas.cirad.fr>.



LE MODÈLE MULTI-AGENTS ¹

Les systèmes multi-agents (SMA) sont des programmes informatiques qui permettent la simulation de systèmes complexes : ils modélisent des entités artificielles et/ou naturelles qui interagissent pour produire des comportements collectifs. Ils sont constitués d'un ensemble de processus informatiques se déroulant en même temps, donc de plusieurs agents vivant au même moment, partageant des ressources communes et communiquant entre eux. Selon cette définition, l'objectif que nous avons attribué aux SMA était l'appréhension de la capacité d'évolution du territoire rural analysé et les conséquences de cette évolution en terme de distribution de l'IcP. Le modèle a donc été élaboré de façon à prendre en compte la complexité des liens entre acteurs, leurs stratégies et les différentes échelles spatiales.

Les agents, qui peuvent être à la fois des entités spatiales (parcelle, exploitation, bassin versant) et des entités sociales (exploitant, institution), sont reliés entre eux selon des règles d'évolution identifiées au cours des analyses statistiques. Par exemple, lorsque l'agent "exploitant" présente un comportement de lutte face aux organismes nuisibles de type "raisonné" et que l'orientation culturelle de l'agent "ilot" est la banane, l'ananas ou l'arboriculture fruitière, l'IcP de

l'agent "parcelle" est faible dans 83 % des cas, nul dans 15 % des cas et moyen dans 2% des cas.

La structure du modèle repose sur la rasterisation des données SIG. Outre les courbes d'évolution de différentes variables au fil de la simulation, l'une des sorties de la plate forme de simulation est donc une grille spatiale représentant la distribution des cultures en place, ou bien celle des exploitations, ou encore celle de l'IcP, pour chaque pas de temps. La comparaison de ces grilles spatiales avec les courbes d'évolution globale (évolution du nombre d'exploitations de chaque type, évolution de la surface en banane), permet de tirer des conclusions intéressantes et d'engager des pistes de réflexion sur le lien entre les scénarii et la pollution des eaux par les pesticides d'origine agricole.

UN EXEMPLE D'APPLICATION : LE SCÉNARIO "OPÉRATIONNEL"

Compte tenu de l'importance de la structure foncière dans le système rural étudié (surface des entités "parcelle" et "ilot", SAU, mode de faire-valoir, parcellaire de l'exploitation, cf. figure 1), c'est ce déterminant qui a été testé à l'échelle du territoire. Le scénario "opérationnel" fait ainsi évoluer les modes d'accès à la



terre des exploitants en fonction de règles de décision et de processus qui s'expriment à plusieurs échelles :

- la dynamique naturelle de la population d'agriculteurs constitue le moteur du changement : chaque pas de temps de la simulation correspondant à une année, les agents "agriculteurs" vieillissent d'un an à chaque pas de temps. Passé un certain âge, les exploitants partent à la retraite. Le départ à la retraite engendre alors le passage de certains îlots d'une exploitation à l'autre (vente/location).
- la redistribution des îlots (vente/location) s'effectue en fonction de règles à l'échelle de l'exploitation (capacité de l'exploitant à acheter ou louer), mais aussi en fonction de la réglementation foncière en vigueur (schéma départemental des structures).

En raison des règles probabilistes liant les agents spatiaux et sociaux du modèle, dès lors qu'une exploitation agrège un îlot, sa superficie s'en trouve changée, de même que le mode de faire-valoir majoritaire de l'exploitation et l'éclatement des îlots : il en ressort un nouveau type d'exploitation. En conséquence, l'îlot, inclus dans un ensemble stratégique différent, voit ses attributs évoluer. Au final, l'IcP est recalculé.

Au terme des simulations lancées sur 17 pas de temps, on observe deux faits majeurs : une augmentation surfacique des exploitations de

faire-valoir stable (propriété ou fermage) et la généralisation de pratiques raisonnées (principalement due à la venue de jeunes agriculteurs formés et sensibilisés aux questions environnementales).

Ces deux phénomènes cumulés ont pour conséquence une diminution globale des valeurs d'IcP (fig. 2).

Ces évolutions générales sont intéressantes en soi car elles confirment l'hypothèse d'une corrélation entre mutations spatiales (réglementation foncière) et environnement (IcP).

Certes la venue de nouveaux agriculteurs mettant en œuvre des pratiques raisonnées constitue le fait provoquant le plus fortement la baisse de l'IcP (c'est le cas des parcelles en IcP fort au début de la simulation qui passent en IcP faible en fin de simulation).

Cela vient confirmer l'importance de la formation et de la sensibilisation des agriculteurs aux problématiques environnementales.

Cependant, d'autres parcelles, restées aux mains des mêmes exploitants, voient également leur IcP diminuer fortement en raison de l'augmentation surfacique de l'exploitation et du passage en mode de faire-valoir stable de la majorité des îlots (c'est le cas des parcelles en IcP très fort qui passent en IcP nul à moyen en fin de simulation).

Ainsi ces simulations permettent-elles de souligner l'importance de l'aménagement de l'espace à l'échelle d'un territoire rural (rôle du Schéma Directeur Départemental des Structures)

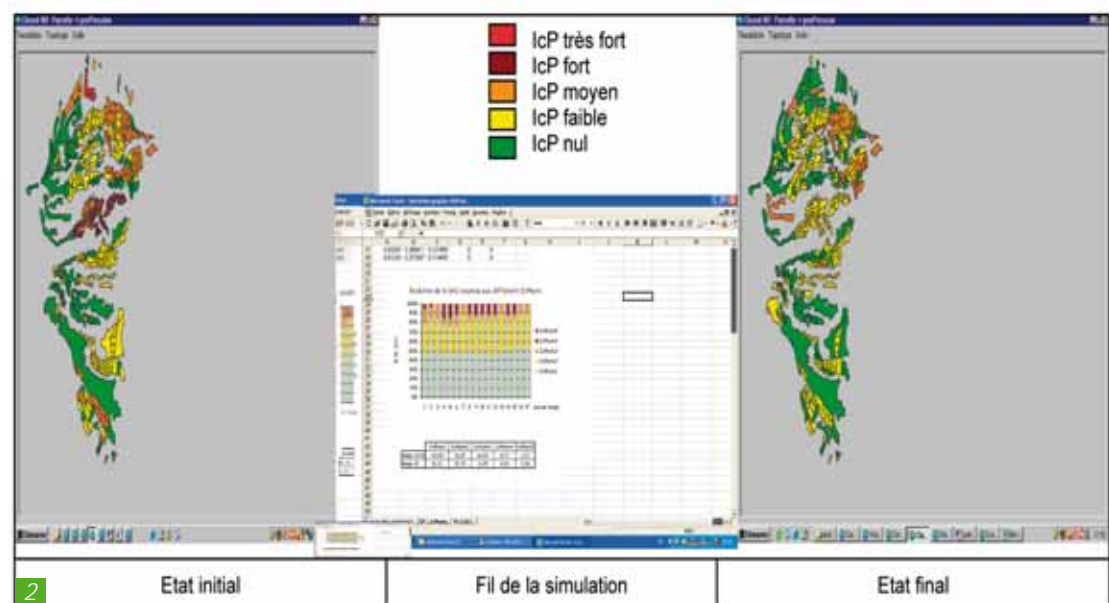


Figure 2.
évolution de la
distribution de l'IcP
au cours de la
simulation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CIRAD (2004). Etude des risques de pollution d'origine agricole en Martinique et Guadeloupe. Le Lamentin, CIRAD, Pôle de Recherche Agronomique de Martinique : 101 + annexes.

Houdart, M. (2005) Organisation spatiale des activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides. Modélisation appliquée au bassin-versant de la Capot, Martinique. Doctorat de Géographie, Université des Antilles et de la Guyane.

Houdart, M., Bonin, M., LePage, C., Fort, M., Saudubray, F. (2005). "SIG, Chorèmes et Systèmes Multi-Agents, Evolution d'un système rural martiniquais et pression polluante." Revue Internationale de Géomatique n°15/3: 339-356.

pour la résolution d'un problème environnemental déclenché à l'échelle de la parcelle (IcP).

CONCLUSION

Si les simulations présentées dans cet article n'ont à aucun moment pour objectif de prédire l'avenir de l'agriculture et de la pollution sur la rive gauche de la Capot, elles permettent d'engager une réflexion autour de ce qui est susceptible d'arriver dans un certain contexte et selon certaines conditions. Cette réflexion, accompagnée d'une bonne connaissance du terrain et de la problématique agro-environnementale, peut faire des systèmes multi-agents un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires du monde agricole et environnemental.

De surcroît, outre le travail entre chercheurs et gestionnaires, la prise en main d'un tel outil de simulation pousse à réunir des chercheurs de disciplines diverses pour réfléchir à la façon de lier des travaux effectués à des échelles différentes et donc les résultats de recherche variés. Interfacé avec le modèle SIMBA par exemple, cet outil peut permettre de simuler, toujours dans un contexte bien défini, l'évolution des territoires en liaison d'une part avec celle des systèmes de culture et de leur impact sur l'environnement (indicateur R-Pest) et, d'autre part, le rendement des systèmes de culture en fonction de leur âge et de leur localisation. Les recherches en ce sens sont actuellement en cours et font l'objet d'un partenariat avec le CIRAD et l'INRA de Guadeloupe.



Quelques faits marquants de l'année 2006 au PRAM

VISITES OFFICIELLES

- 3 avril** Délégation du Conseil Général conduite par Christian de Verclos, Directeur général adjoint des services départementaux, chargé des Services techniques et économiques.
- 25 avril** Marie-France PAGNIER, Ambassadeur de France à Cuba et Cécile POZZO di BORGO, Ambassadeur de France en République Dominicaine.
- 22 juillet** Dominique BUSSEREAU, Ministre de l'Agriculture et de la Pêche.
- 23 novembre** Marie-Georges BUFFET, Secrétaire nationale du PCF.

MANIFESTATIONS

- 26 avril** Participation à la 7^e Journée technique de l'Association Martiniquaise pour le Développement des Productions Agricoles (AMADEPA).
- 2 au 5 octobre** Participation à l'atelier régional sur la cercosporiose noire en Guadeloupe.
- 5 octobre** Organisation conjointe d'une Journée "Portes ouvertes" entre le Pôle Agroalimentaire Régional de la Martinique (PARM), le Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique (PRAM) et le Centre Technique de la Canne et du Sucre (CTCS) sous l'égide du Conseil Régional.
- 9 au 15 octobre** Participation à la Fête de la Science.
- 4 et 5 novembre** Participation à la 3^e édition du Village de l'écologie et des alternatives organisée par la Ville de Sainte-Anne (Martinique).
- 7 et 8 novembre** Participation aux ateliers de coopération régionale à Sainte-Lucie, organisés par le Cirad.

Départs/Arrivées de chercheurs et ingénieurs

- Départ de Christian Langlais, responsable de l'UPR horticulture
- Arrivée de Paula Fernandes, chercheur UPR horticulture, successeur de C. Langlais
- Départ d'Erik Braudeau, responsable du laboratoire de Pédologie
- Arrivée de Magalie Jannoyer-Lesueur, chercheur en Production fruitière intégrée
- Arrivée de Béatrice Rhino, entomologiste, UPR horticulture
- Départ de Daniel Barreteau, Directeur du Centre IRD Martinique
- Arrivée de Marc Morell, successeur de Daniel Barreteau



Site Internet
www.pram-martinique.org

LES CAHIERS DU PRAM N°6

Edité par le Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique (PRAM)

Directeur de la publication : Thierry GOGUEY (Cirad)

Coordination : Pierre MARIE (Cemagref), Philippe TIXIER (Cirad), Thierry WOIGNIER (IRD)

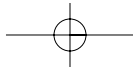
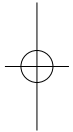
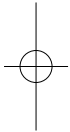
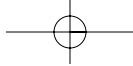
Comité de lecture : Monique ARNAUD (Cemagref), Thierry GOGUEY (Cirad), Justine LORDINOT (IRD),
Pierre MARIE (Cemagref), Marc MORELL (IRD), Anne RIZAND (Cemagref), Philippe TIXIER (Cirad), Thierry WOIGNIER (IRD).

Photographies : PRAM

Conception, photogravure, impression :  05 96 75 14 15

Tirage : 500 exemplaires – Décembre 2006

N° ISSN : 1638-3974





Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement



Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement



Institut de recherche pour le développement



Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique

Quartier Petit-Morne - BP 214 - 97285 Le Lamentin Cedex 2 - Tél. 05 96 96 42 30 00 - Fax 05 96 42 31 00

Site Internet : pram-martinique.org

