



**ETUDE DES RISQUES DE POLLUTION D'ORIGINE AGRICOLE
EN MARTINIQUE ET EN GUADELOUPE**

**GESTION DES TRANSFERTS (eau, sol, produits phytosanitaires et engrais) A L'ECHELLE
DU BASSIN VERSANT.**

Rapport Final
(Financement FNSE, Région, FEDER)

15 novembre 2003

coordonnateurs : P. Cattan, M. Dulcire/M. Bonin

Participants :

CIRAD FLHOR /TERA

INRA APC

INRA Montpellier

Cattan P.

Cabidoche Y.M.

Voltz M.

Dulcire M. / Bonin M.

Clermont-Dauphin C.

Louchart X.

Onapin G.

Bussière F.

Huttel O.

Tixier P. / Simon A / Lefevre C. / André J.

Charlier J.B.

Mucilba A.

Palmier C.



CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

1.1 Contexte

Les récentes analyses d'eau de captage pour la consommation en Basse Terre ont révélé, pour 9 d'entre eux, des taux inquiétants pour des molécules pesticides utilisées il y a quelques années par l'agriculture (organochlorés). D'autre part, les résultats récents obtenus en Martinique et en Guadeloupe, à l'échelle parcellaire et sans qu'on ait pu en préciser les déterminants, attestent de la présence des pesticides actuellement épandus en bananeraie dans les eaux de drainage et de ruissellement. Il existe donc, pour les anciennes molécules et pour les nouvelles, un réel problème de pollution par des produits toxiques pour l'homme justifiant qu'on s'y intéresse.

Deux types de pollution peuvent être distingués et nécessitent des traitements différenciés : l'une est le fait des anciennes molécules rémanentes – il s'agit d'identifier les sites de fixation des molécules et de les dépolluer ; l'autre provient des molécules actuellement utilisées – il s'agit de faire évoluer les pratiques agricoles en relation avec leur incidence sur la dispersion des molécules dans le milieu. Dans les deux cas, les mécanismes entrant en jeu dans le transport de ces molécules sont similaires.

C'est dans ce cadre que les équipes du CIRAD de la Martinique et de la Guadeloupe, avec leurs partenaires (INRA, IRD, CEMAGREF) et sous l'égide des deux DIREN, ont engagé une réflexion conduisant à définir des projets complémentaires présentés pour financement (en Guadeloupe et en Martinique) et qui portent : 1. Sur la gestion des transferts d'eau de terre et de solutés en Guadeloupe ; 2. Sur l'évaluation de l'impact de pratiques culturales raisonnées sur la qualité de l'eau en Martinique. C'est le premier de ces projets, traitant des transferts (partie nécessaire à l'ensemble des projets) et concernant les molécules actuellement utilisées, dont on présente ici l'état d'avancement.

1.2 Objectifs généraux du projet

Le projet a pour objectifs :

1.2.1. De mieux connaître les impacts de l'agriculture sur l'environnement

- effets des pratiques culturales sur les fonctions environnementales des sols, leurs propriétés hydrodynamiques et les transferts d'eau et de pesticides.
- quantification des transferts d'eau et de pesticides au sein d'un bassin versant ;

1.2.2. De proposer des alternatives aux pratiques existantes

- analyse de la diversité des pratiques et de leurs justifications ;
- identification des conditions d'adoption des innovations destinées à minimiser l'impact négatif des pratiques agricoles sur la qualité des eaux

Pour réaliser ces objectifs les actions ont été menées à différentes échelles, de la parcelle au bassin versant. Pour ce dernier, la partie cultivée du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre B/E a été retenue. Ce territoire comporte une grande diversité de systèmes de culture bananier (mécanisé, irrigué, manuel...) et de zones pédo-climatiques (des zones littorales aux zones d'altitude).

**MIEUX CONNAITRE LES IMPACTS DE
L'AGRICULTURE SUR L'ENVIRONNEMENT**

PARTIE 1. INCIDENCE DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LES FONCTIONS ENVIRONNEMENTALES DES SOLS

La diversité des systèmes de culture bananiers - en fonction des sols, de la pluviométrie, du travail du sol et des apports d'engrais et de pesticides - est susceptible d'avoir conduit à un ensemble de situations contrastées vis à vis des fonctions environnementales des sols et de leurs propriétés biologiques et hydriques (sensibilité à l'érosion et au ruissellement, hydromorphie). La question se posait de l'état des relations entre les propriétés biologiques et hydriques du sol et les pratiques des agriculteurs afin d'identifier les facteurs anthropiques favorables ou aggravants. Deux enquêtes ont été menées : la première s'intéresse aux propriétés biologiques et physico-chimiques des sols ; la seconde porte sur les propriétés hydrodynamiques des sols.

1. Impact du travail du sol, de l'application d'engrais, et de zoocides sur les états et propriétés biologiques et physico-chimiques des sols

(Clermont-Dauphin, Cabidoche, Risède, André, Burner, Desfontaines, Mulciba, Palmier, Razan + stage ENITA Danneville)

1.1 Matériel et Méthodes ; Réalisation

Cette étape a consisté à établir un diagnostic agri-environnemental, selon une approche « space for time », dans laquelle on utilise la diversité des pratiques dans les systèmes de culture bananiers, caractérisées entre autres par des niveaux d'intrants entre l'absence et l'excès, pour analyser l'impact du travail du sol, de l'application d'engrais, et de celle de zoocides sur les états et propriétés biologiques et physico-chimiques des sols. Une telle approche permet d'établir rapidement des trajectoires d'évolution des états du milieu, alors que la définition expérimentale de ces trajectoires demanderait d'importants moyens, et une durée incompatible avec l'urgence du diagnostic.

La diversité requise dans les systèmes de culture a pu être trouvée dans la zone bananière d'altitude, sur andosols et sols bruns andiques, ou co-existent tous les intermédiaires entre les parcelles labourées tous les 3 ans, fertilisées, et traitées aux zoocides depuis longtemps, et des bananeraies pérennes depuis plusieurs dizaines d'années, sans fertilisant depuis plus de quinze ans, et jamais traitées.

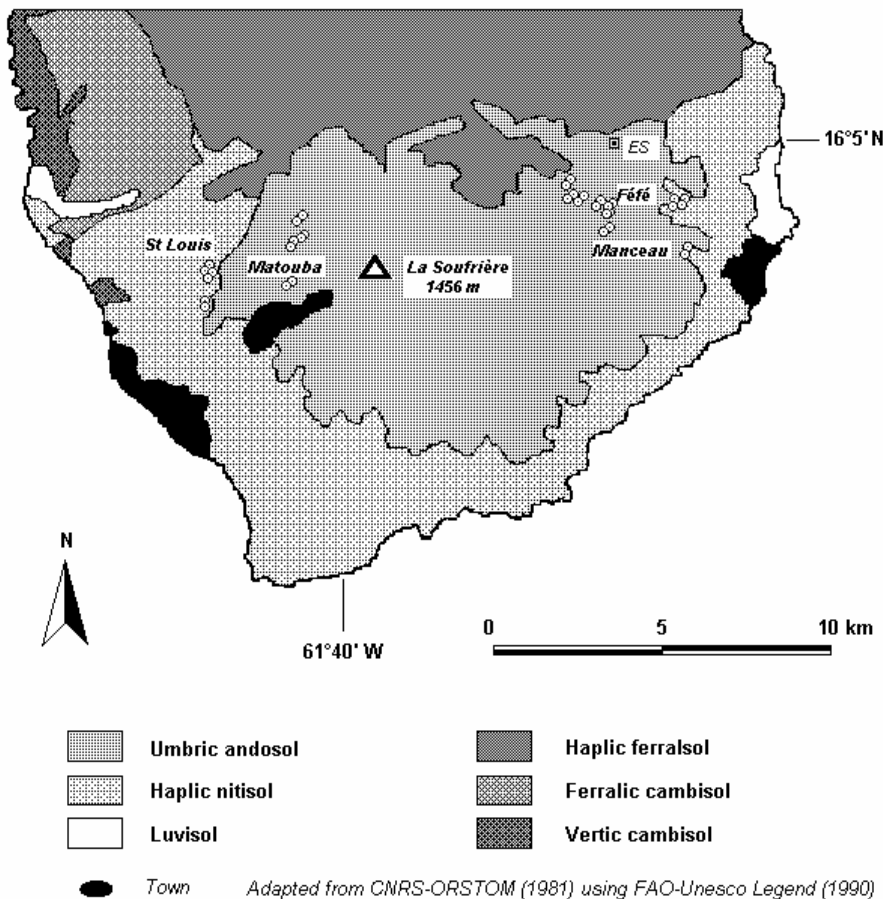
Trente-six parcelles d'agriculteurs réparties sur l'ensemble de la zone bananière d'altitude, ont été retenues, après enquête sommaire sur la capacité des agriculteurs à noter les intrants et sur les modalités de conduite. Les chroniques d'intrants ont été renseignées depuis 1980. Elles permettent d'établir et de découpler divers degrés d'intensification des cultures (travail du sol, traitements nématicides, fertilisation) (tableau 1). Vingt parcelles (figure 1) ont été caractérisées d'un point de vue physique (porosité des sols, risque de ruissellement, érosion) ; chimique (stock organique, état physico-chimique, quantité et proportion d'éléments nutritifs majeurs) ; biologique (activité macrobiologique et microbiologique, biodiversité de la pression parasitaire).

Tableau 1 : Moyennes (écarts-types) des applications d'engrais et de zoocides depuis 10 ans dans les différentes classes de systèmes de culture

	Pole non intensif (NIP)	Intermédiaire 1 (T1)	Intermédiaire 2 (T2)	Pole Intensif (IP)
N- K (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	88 N (± 66) 77 K (± 66)	660 N (± 220) 550 K (± 220)	660 N (± 220) 550 K (± 220)	990 N (± 220) 880 K (± 220)
matières actives zoocides (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	4.2 (± 3.3)	6.6 (± 3.3)	26.4 (± 6)	26.4 (± 6)

Les prélèvements et mesures ont été effectués selon un schéma croisant la topographie (zones hautes ou convexes, zones basses ou concaves) et la position par rapport aux bananiers (au pied, au quart et à moitié de la distance séparant deux bananiers). Les analyses ont porté sur les couches de sol 0-10, 10-30 et 30-50 cm supportant l'essentiel de la zone racinaire du bananier. Le bassin versant expérimental de Haut Fédé appartenant à cette zone, les analyses de sols et suivis de pratiques obtenus à l'occasion de la caractérisation du bassin ont pu compléter la collection de résultats.

Figure 1: Position des bananeraies (cercles centrés) sur la carte simplifiée des sols du sud de la Guadeloupe. ES est la parcelle expérimentale CIRAD-FLHOR



1.2 Résultats

Les variables de sol ont été traitées par une analyse de variance à quatre voies (procédure GLM de SAS Software) ; pour chaque variable,

$$Y = \text{effet sol\&climat} + \text{effet travail du sol} + \text{effet fertilisation} + \text{effet zoocides}$$

1.2.1. Impact du travail du sol :

Le travail du sol réduit la porosité intra-agrégat. Pendant les phases de travail et début de plantation, la dessiccation superficielle est suffisante pour que des micro-fissures de retrait se forment et qu'elles provoquent une auto-fragmentation des agrégats de surface à la moindre pluie. Ces agrégats de taille millimétrique deviennent transportables par le ruissellement, il s'ensuit une érodibilité superficielle des sols, avec un possible transport momentané de molécules xénobiotiques sorbées sur les particules solides.

Au contraire, les bananeraies pérennes ne montrent pas de transfert de solide du haut vers le bas : la teneur en eau à 1 kPa¹ de succion et les stocks organiques sur 30 cm ne montrent pas de différence significative entre haut et bas. Compte tenu de la désynchronisation des récoltes, elles sont toujours couvrantes à plus de 80%, et les trouées sont couvertes par les résidus : le sol n'a donc jamais l'occasion d'être anormalement desséché en surface. Les bananeraies pérennes sont des couverts protecteurs contre l'érosion.

Le travail du sol accroît durablement l'infiltrabilité superficielle, mais dans les cas d'utilisation de pulvérisateurs à disques, il peut réduire la conductivité hydraulique à saturation en créant une semelle de labour compactée. Outre le handicap du passage des racines, cette semelle entraîne une augmentation du coefficient de ruissellement, et donc du transport de solide et de solutés, sous les pluies intenses et durables.

Le travail du sol entraîne une diminution des stocks organiques sur 30 cm, de l'activité microbienne (évaluée par respirométrie après ajout de glucose), de la biomasse de vers de terre *Pontoscolex corethrurus*, ainsi qu'un accroissement de l'effectif du nématode endoparasite racinaire du bananier *Radopholus similis*.

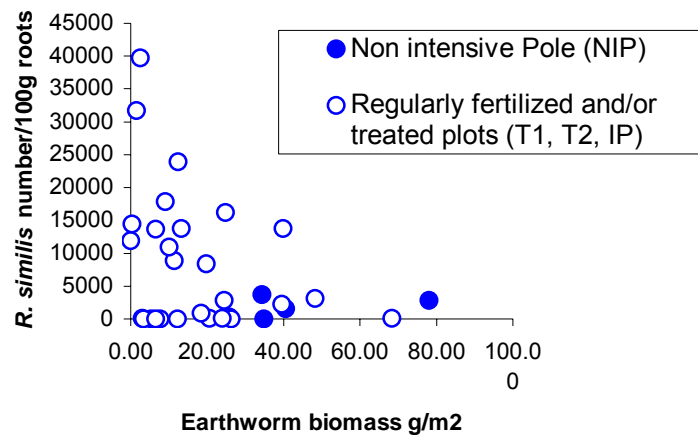
Sous bananeraies pérennes fertilisées et traitées sur andosols, les conditions pédoclimatiques les plus régulières et la productivité de biomasse la plus élevée s'accompagnent de l'activité microbienne et des stocks organiques les plus élevés ; ces derniers atteignent de 140 à plus de 170 t de carbone à l'hectare (couche 0-30 cm), à comparer aux 80 à 110 tC/ha sous forêt et aux 43 à 63 tC/ha sous bananeraie labourée obtenus par Feller et al (2001) sur les couches 0-20 cm d'andosols de la Martinique et de la Dominique : les bananeraies pérennes intensives sur andosols sont de remarquables cultures de séquestration du carbone. Néanmoins, les bananeraies pérennes à faibles niveaux d'intrants avec un stock de 100 à 140 tC/ha devraient présenter la meilleure séquestration nette (C stocké – C utilisé pour la fabrication et le transport des intrants).

1.2.2. Impact des zoocides

L'application régulière de zoocides ne réduit pas obligatoirement la population de nématodes-cible mais réduit au contraire la biomasse de vers et d'autres espèces de nématodes indicatrices de zoo-diversité (figure 2) ; d'où une hypothèse forte : la perturbation non intentionnelle des populations macro- et mésofauniques par les zoocides, favoriserait « l'explosion » de *R. similis*, qui obligerait à traiter ensuite sans relâche.

¹ L'utilisation de ce critère simple est fondée sur le mécanisme d'érodibilité de ces sols, qui passe par un retrait dû à une dessiccation anormale ; cette dessiccation est par ailleurs irréversible. Si les couches superficielles du sol des parties basses montrent une teneur en eau anormalement basse à 1kPa de succion (potentiel matriciel de -1 kPa), c'est qu'elles dérivent d'agrégats transportés.

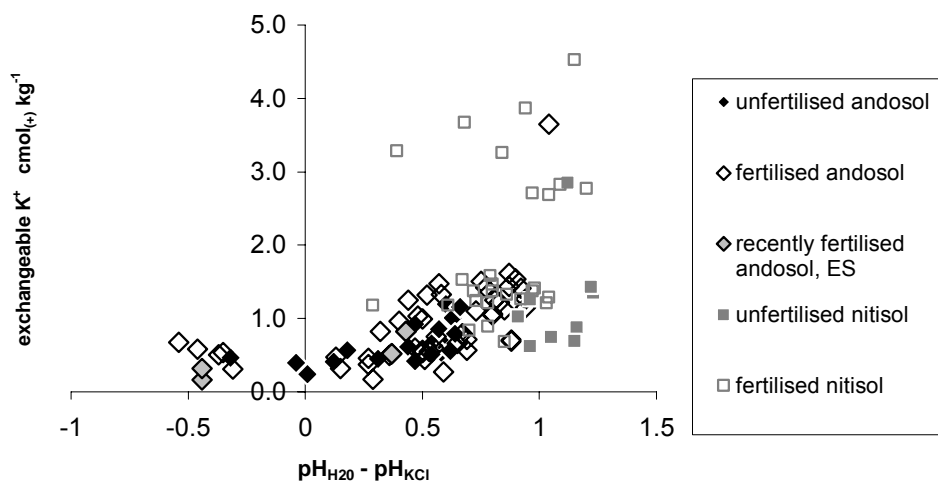
Figure 2 : Relation entre la biomasse moyenne de vers (*Pontoscolex coroethrurus*) et l'infestation des racines par *Radopholus similis*.



1.2.3. Impact de la fertilisation

La fertilisation en excès de N et K et le chaulage dans les sols bruns andiques entraînent une baisse du stock de Ca et Mg et un accroissement du stock de K ; c'est un comportement classique de sol à halloysite, montrant généralement une « préférence » pour le potassium. Dans les andosols, si l'accroissement du stock de Ca et Mg est visible, il reste faible pour K, dépendant de l'état des charges variables : le potassium apporté en excès ne s'accumule pas lorsque le pH est proche du point de charge nulle ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \leq \text{pH}_{\text{KCl}}$), ce qui est le cas dans les parcelles non chaulées (figure 3).

Figure 3 : Limitation de la sorption du potassium dans les andosols près du point de charge nulle



L'application de fertilisants réduit significativement le nombre et la biomasse de vers de terre près du faux-tronc, où sont épandus les engrais, mais seulement le nombre dans interrang

2. Effet des pratiques culturales sur les propriétés hydrodynamiques des sols.

(Cattan, Cabidoche, André, Mulciba, Palmier + stage ENH Perpina)

2.1 Réalisation

Des parcelles d'observation ont été identifiées sur le bassin versant de la rivière Pérou qui présente la diversité de situations requises tant en ce qui concerne les systèmes de culture que les situations pédo-climatiques. Les variables de stratification retenues pour le choix des parcelles ont été basées sur : le sol (deux zones retenues : 4 parcelles au lieu dit Féfé sur andosols et 4 parcelles à Noville sur sol brun rouille à halloysite) ; les types de système de culture (absence ou présence de mécanisation) comparés à des implantations sous forêt ; la toposéquence (haut, milieu et bas de morne) déterminant les zones de départ, de transfert et d'accumulation des particules solides voire substances solubles. Dix-huit profils ont été ouverts et décrits. Dans chacun d'entre eux, des mesures de densités apparentes (méthode du cylindre) et d'infiltration (infiltromètre à disque) ont été pratiquées. Des analyses de laboratoire ont complété les mesures de terrain et ont porté sur l'étude de la porosité des différents horizons des sols, et sur leurs principales caractéristiques physico-chimiques (C, N, pH, CEC).

2.2 Résultats

Les systèmes de culture étudiés sont représentatifs d'une petite agriculture pratiquée en zone de morne se caractérisant par de fortes pentes alternant avec des terrasses. La zone de Féfé se situe à proximité du parc national et se caractérise par une forte pluviométrie. Les systèmes de culture sont essentiellement non mécanisés excepté sur les zones planes permettant le passage des outils. La topographie et l'histoire géologique mouvementées de la zone amènent une forte différenciation des situations. Aux sols de pentes et des hauts de morne possédant une forte macroporosité (pores du sol occupés par l'air et nécessaires au développement du système racinaire) succèdent des zones engorgées à l'approche de la terrasse, saturées en permanence du fait de la rétraction des sols à la dessiccation et du climat local très pluvieux. Dans les parties non mécanisables, l'agriculteur adapte ses techniques en pratiquant un buttage qui permet d'éviter l'engorgement des sols en surface et de gérer les écoulements de surface. La pénibilité du travail le fait recourir à la mécanisation dès qu'elle est possible. Elle conduit au labour des parties engorgées qui crée, à la profondeur limite de travail des outils, une zone de faible infiltration hydromorphe que les racines ne pénètrent pas et qui témoigne de l'inadaptation de la technique utilisée. Le résultat agronomique à court terme comparé aux parcelles du morne est cependant peu visible puisqu'il s'agit de la meilleure parcelle de l'exploitant pour des objectifs de rendements cependant relativement faibles (30 t/ha). La durabilité de la parcelle (atteinte à son fonctionnement hydrique) s'en trouve néanmoins affectée ainsi que celle de la bananeraie enracinée superficiellement et donc vraisemblablement plus sensible au vent.

Les agriculteurs de la zone de Noville, plus sèche et aux pentes moins accentuées, adoptent une mécanisation plus poussée. L'effet travail du sol s'observe surtout en bas de pente vraisemblablement en relation avec un taux d'humidité plus élevé lors du travail, et se traduit par la présence de mottes de terre fortement tassées. La capacité de rétention en eau des sols s'en trouve diminuée ainsi que la prospection racinaire, les racines ne pouvant pénétrer les mottes tassées.

En conclusion, la diversité des situations montre la nécessité d'adapter les pratiques agricoles à l'échelle locale. Certains agriculteurs s'y emploient sans toutefois trouver, dans la panoplie des techniques disponibles ou vulgarisées, celles adaptées à leur cas particulier (cas des labours sur andosols de Féfé). L'économie de temps que procure la mécanisation des parcelles en vue de la replantation (destruction bananeraie et maîtrise des adventices) est un facteur de poids qui conduit, sans autres alternatives, à des atteintes fortes aux fonctions

environnementales des sols (circulation des eaux et milieu de développement des plantes). La persistance de ces atteintes est importante, alors qu'on trouve des traces de compactage sur des sols non mécanisés depuis une dizaine d'années. Chez tous les agriculteurs rencontrés, l'objectif du travail du sol n'a jamais été l'amélioration de leurs propriétés physiques qui de fait permettent en l'état la croissance des plantes. Si la mécanisation apparaît nécessaire aux agriculteurs, des voies basées sur l'utilisation d'outils de travail plus superficiel combiné à la lutte chimique contre les adventices sont à recommander.

PARTIE 2. QUANTIFICATION DES TRANSFERTS D'EAU ET DE PESTICIDES A L'ECHELLE LOCALE

La contamination des ressources en eau, que ce soient des nappes ou des écoulements superficiels, sont régis à la source par des **phénomènes originaux propres aux bananeraies sur andosols** :

Un fonctionnement hydrologique distribué :

- par l'interception-redistribution de la pluie par l'architecture particulière des bananiers, qui amène sur certaines surfaces du sol des flux d'eau nettement plus intenses que la pluie,
- par la redirection de ces flux soit en drainage vers les nappes, soit en ruissellement sur des chemins d'eau particuliers, dont l'efficacité est liée à la distribution des infiltrabilités superficielle, à la micro-topographie, et à la couverture du sol.

Une capacité de sorption pour une grande panoplie de molécules, via une diversité des interactions physico-chimiques possibles :

- liaisons ioniques et polaires, réglées par une propriété singulière des andosols : ces sols riches en allophane (gels d'oxyhydroxydes organo-métalliques) ont des charges de surface variables en fonction du pH. Ainsi lorsque le pH est inférieur au point iso-électrique (« zero point of charge » ou ZPC), peut apparaître une capacité de sorption des anions (dont nitrates) (CEA) alors que la capacité de sorber des cations (CEC) devient très faible. Au contraire, si l'on élève artificiellement le pH, par exemple par chaulage, on retrouve un comportement ordinaire de sol à capacité d'échange cationique.
- liaisons hydrogène capable de sorber la plupart des molécules organiques hydroxylées ou hydrogénées (ce qui participe à l'exceptionnelle teneur en matières organiques des sols à allophane).
- interactions hydrophobes, susceptibles de sorber la plupart des molécules organo-halogénées, en particulier les pesticides organo-chlorés (chlordécone, isomères de l'hexachlorocyclohexane...).

1. Fonctionnement hydrologique distribué à l'échelle locale

1.1 Redistribution de la pluie

(Bussière, *Cattan*, Artis, Nannette, Taupe, + thèse Bassette)

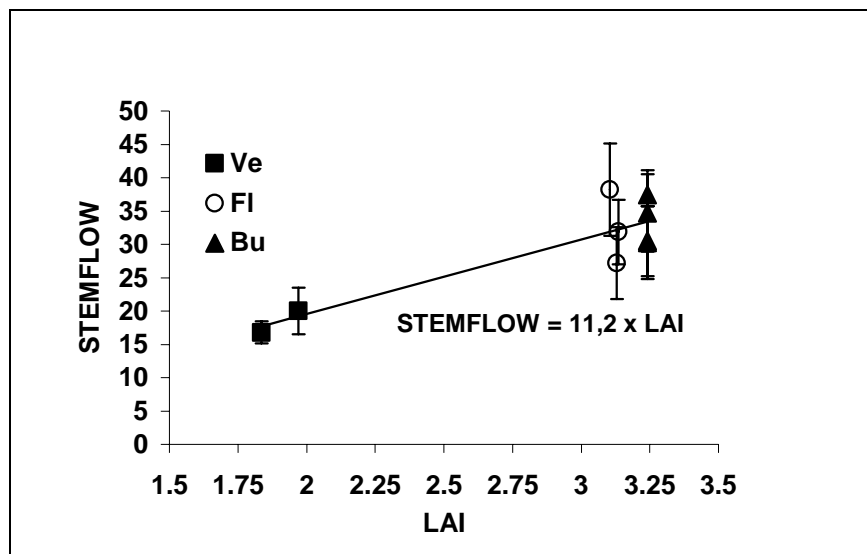
Les phénomènes de concentration de la pluie par le bananier ont été étudiés, notamment grâce à l'acquisition d'un digitaliseur 3D de plantes in situ ; cet appareil a permis de préciser, grâce à la mise au point d'un modèle d'écoulement sur l'architecture foliaire de la plante, à quel stade et à quel endroit les bananiers relâchent des filets d'eau concentrés susceptibles d'entraîner les granulés d'engrais ou de produits phytosanitaires et de les dissoudre précocement dans des flux localisés de ruissellement et de drainage.

La redistribution localisée la plus importante est l'écoulement le long du faux-tronc (ou stemflow), délivré au sol au pied du bananier. Cet écoulement, dont la proportion est croissante avec le développement de l'architecture foliaire du bananier (figure 4), peut représenter jusqu'à plus de 40 fois la pluie incidente ramenée à la section basale du faux-tronc, à partir de la floraison. C'est donc un véritable ruisseau qui se forme à la base du bananier, dont le débit peut dépasser la capacité d'infiltration locale du sol (jusqu'à 2500 mm/h ramené à la section basale du faux-tronc, contre 400 mm/h au maximum à la surface du sol) et ruisseler sur quelques décimètres avant que son étalement autorise l'infiltration.

Figure 4 : Evolution du stemflow (rapport entre la pluie transmise et la pluie incidente sur l'aire basale du faux-tronc) de 6 bananiers selon les indices foliaires (LAI = surface de feuilles / surface au sol) à 3 stades de développement du couvert.

.Ve : début de repousse des rejets, FI : bananeraie plantée en début de floraison, Bu : bananeraie en cours de fructification

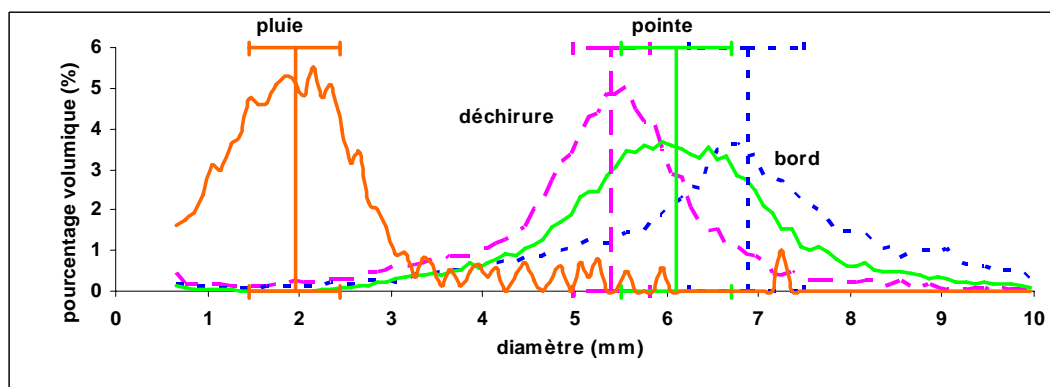
Les barres verticales représentent les écarts-type des mesures



Les autres points d'écoulement sont distribués sur des points particuliers des premières feuilles visibles au zénith depuis la surface du sol : déchirures, déversoirs de bordure et pointes de feuilles. D'importance volumique moindre que le stemflow, ces écoulements fournissent des gouttes dont l'énergie cinétique est accrue par rapport à celle de la pluie, notamment à cause d'un accroissement de la taille des gouttes délivrées (figure 5). Ces écoulements concentrés peuvent détacher des particules de solide (agrégats ou granules), ensuite plus facilement entraînées par le ruissellement, et finissent par former des cratères à infiltrabilité réduite contribuant à l'accroissement du ruissellement.

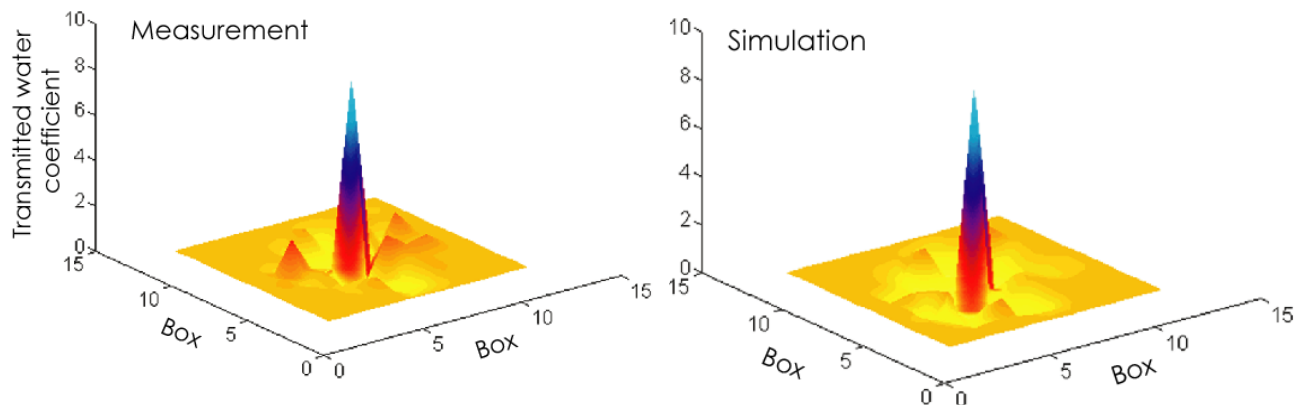
Figure 5 : Distribution volumique de taille de gouttes d'une pluie artificielle et des principaux sites d'égouttage de feuilles de bananiers.

Les barres verticales représentent le diamètre moyen de gouttes, les horizontales leur écart-type.



Un modèle d'écoulement, « DROP » a été élaboré, afin d'intégrer la totalité des mécanismes de la redistribution de la pluie par le bananier : éclaboussage et détention de la pluie, concentration sur bassins versants de feuilles en cascades, et livraison distribuée au sol des intensités et énergies cinétiques. Les premiers résultats de simulation montrent une bonne restitution de cette livraison au sol (figure 6). Le modèle permet également de rendre compte des interactions entre plantes voisines et pourra permettre d'évaluer l'impact de différents arrangements de plantation où encore de différents ports de plantes.

Figure 6 : Comparaison des transmissions de la pluie mesurées et simulées par le modèle DROP sous un jeune bananier



1.2 Flux de ruissellement et de drainage

(Cattan, Cabidoche, Voltz, André, Mulciba, Palmier + VCAT Lacas + thèse Sansoulet + stage Champoiseau)

1.2.1. Réalisation

Le dispositif expérimental a été implanté sur la parcelle Espérance Haut de la station expérimentale de Neufchâteau. Elle couvre une surface de 5800 m² à une altitude approximative de 250 m NGG. Les autres caractéristiques sont les suivantes :

plus grande largeur : 94 m,
longueur exutoire-haut BV : 91 m,
dénivelée totale : 12 m,
pente moyenne : 0,13 m/m.

Des cylindres de sol ont été prélevés pour caractérisation hydrodynamique au laboratoire (mission de O. Huttel en décembre 2000).



Photo 3 : isolement hydrologique de la parcelle d'étude

Après étude topographique, cette parcelle a été séparée en deux sous-parcelles de surfaces équivalentes séparées par des tôles galvanisées enfoncée à 25 cm dans le sol (Photo 3). Des canaux de ceintures complètent l'isolement hydrologique des parcelles. Deux systèmes de culture ont été appliqués sur chacune des sous parcelles après destruction de la bananeraie précédente au glyphosate et passage d'une rotobèche. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Sous-parcelle 1 = itinéraire planteur (T+)

- Jachère naturelle après rotobêche (destruction de la bananeraie précédente) ;
- 3 passages de pulvérisateur à disques en février 2001 pour détruire la jachère suivis d'un griffage.
- Sillonnage léger dans le sens de la pente à 20 cm de profondeur en direction du canal collecteur pour marquer le sillon de plantation.
- Plantation de vitroplants mi février 2001
- Sillon non refermé pour éviter ensevelissement excessif du vitroplant.
- Désherbage chimique régulier de la plantation
- Epandage des résidus de culture tous les 2 interrangs orientés dans le sens de la pente.

Sous-parcelle 2 = itinéraire amélioré reposant sur l'absence travail du sol et couverture végétale. (T-)

- Jachère naturelle après rotobêche (destruction de la bananeraie précédente) ; contrôle de la couverture au sol par glyphosate
- Plantation de vitroplants au trou mi février 2001
- Conservation d'une couverture morte en cours de culture
- Epandage des résidus de culture tous les 2 interrangs orientés perpendiculairement au sens de la pente.

Les dispositifs de mesures suivant ont été installés :

Variables climatiques : une station de mesure de la pluviométrie, du rayonnement et de la température est installée en bas de parcelle.

Potentiel de l'eau dans le sol : un dispositif tensiométrique a été implanté sur 6 sites (proximité du bananier et interrang) dans le but de modéliser le drainage dans le sol pour l'évaluation du risque de pollution des nappes.

Eaux de ruissellement : un dispositif de mesure des eaux de ruissellement a été installé à l'exutoire de chacune des parcelle (Photo 4). Il est constitué de canaux type venturi en série permettant la mesure de débits de 0.02 à 9 l/s par des débitmètres automatiques. Deux préleveurs automatiques permettent de réaliser, pour chacune des sous parcelles, des échantillons moyens des eaux de ruissellement.



Photo 4 : dispositif de mesure des débits en sortie de parcelle

Eaux de drainage : 8 lysimètres ont été implantés en parcelle. Entre 2000 et 2002, les eaux de drainage ont été collectées sur des lysimètres à suintement libre et succion (système de mèches permettant d'appliquer une succion), installés à 0.7 m de profondeur. Quatre fosses ont été creusées et deux lysimètres ont été installés par fosse, un dans interrang, le second sous le bananier (Photo 1).



Photo 1 : lysimètre sous bananier

L'installation du dispositif s'est terminée fin août 2001, date à partir de laquelle des chroniques de pluviométrie, de ruissellement et de drainage ont été régulièrement enregistrées.

Ce premier dispositif comportait des biais classiques en lysimétrie : sous-estimation du drainage réel par le suintement, et surestimation par les plaques (trop petites) à mèches en fibre de verre (trop longues). Un modèle hydrodynamique développé dans Hydrus 2D a permis de calculer les dimensions de plaques et mèches assorties d'un biais minimal, en conservant des lignes de flux verticales. Un nouveau dispositif lysimétrique comprenant 5 stations de 4 plaques 0.45x0.45 m² à 65 cm de profondeur a été installé en juin 2003, interceptant les flux à différentes positions relatives par rapport aux faux tronc (Photo 2) : sous le bananier ; entre 25 et 70 cm en aval sur le rang ; entre 1.20 et 1.65 en aval sur le rang (soit après un mois, sous la surface foliaire du bananier d'aval distant de 2.20 m) ; dans interrang (non abrité durant les 4 premiers mois).

Photo 2 : Installation des lysimètres à mèches du dispositif de juin 2003.

La couche travaillée (horizon A) est brun foncé, à limite nette. L'horizon (B), riche en allophane, est brun vif.

Au fond, lysimètre à mèche de l'interrang ; à gauche, mèches des lysimètres installés sur le rang. Photo prise en direction du haut de pente.

Parcelle Espérance-haut, CIRAD-FLHOR, Neufchâteau. *Photo J. Sansoulet*



1.2.2. Ruissellement

Le ruissellement naît sur des pluies de faible volume (quelques mm) à partir d'intensités dépassant les 25 mm/h. La fréquence des événements ruisselants est inférieure à 20% des pluies, mais les pluies ruisselant représentent plus de 50% des volumes précipités. Les événements majeurs de ruissellement sont exceptionnels (seules quelques crues constituent l'essentiel des volumes ruisselés) et confèrent de fait aux risques liés aux transports d'éléments polluants un caractère potentiellement grave (lié à la disponibilité des éléments polluants au moment des événements ruisselant) à faible probabilité. Les résultats obtenus permettent de mieux appréhender le fonctionnement hydrologique original de la bananeraie.

Les travaux du sol préparatoires à la plantation orientent durablement la circulation des eaux en parcelle et conduisent, de façon inattendue à des ruissellements peu importants sur les surfaces sillonnées en raison de leur forte infiltration, de la présence des bananiers faisant obstacle aux écoulements et, in fine, de leur faible contribution au ruissellement total. Le relevé des surfaces élémentaires, de leur capacité d'infiltration et de leur connexion avec l'exutoire, permet de dresser un tableau d'activation et de contribution de ces surfaces pour le ruissellement (tableau 2) ; il constitue une première grille de lecture permettant de caractériser le comportement de la parcelle vis à vis du ruissellement.

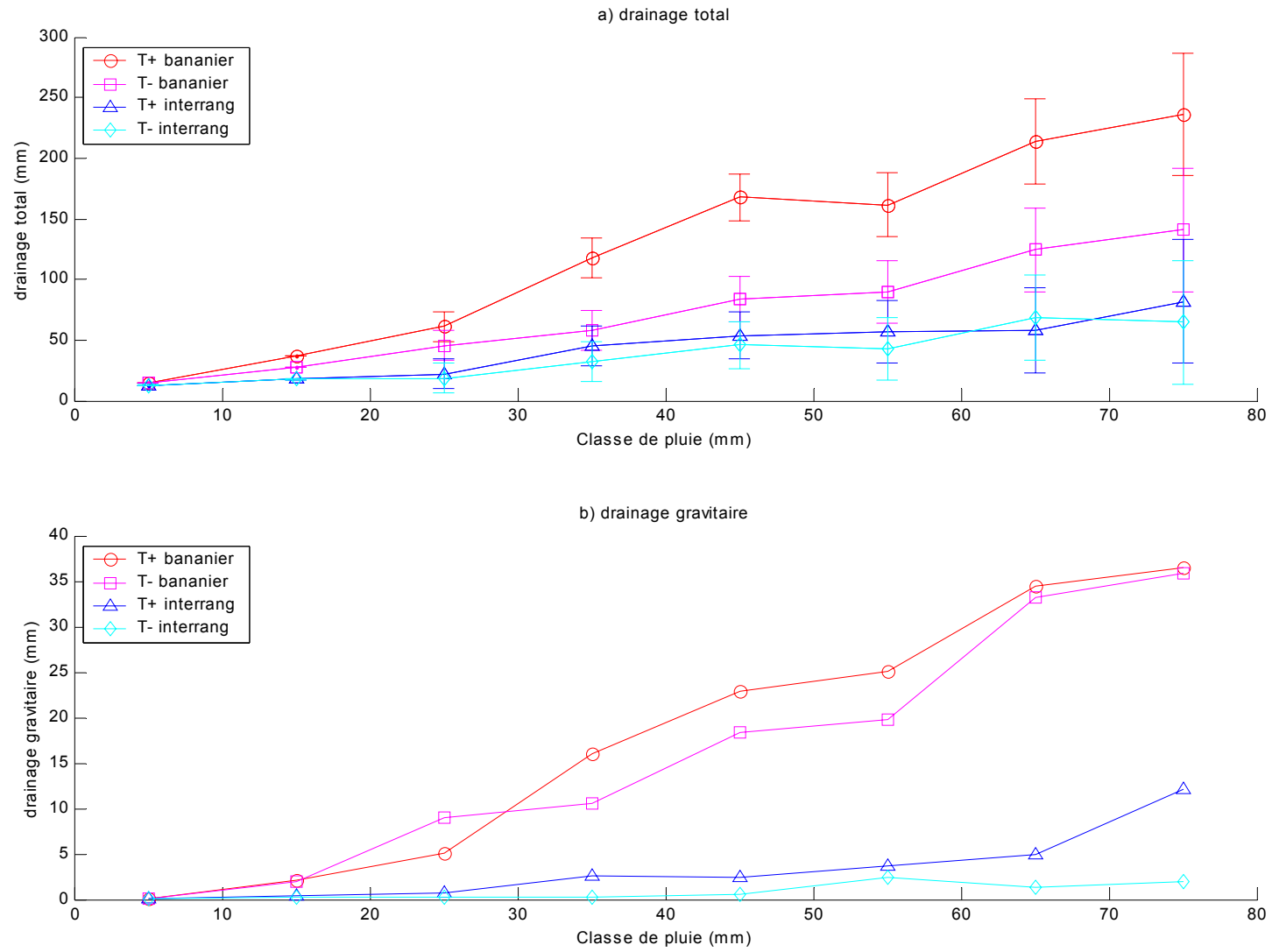
Tableau 2 : ordre d'activation des surfaces au cours des événements ruisselants.

Ordre d'activation des surfaces	T+			T-		
	Surface élémentaire	Connexion hydraulique	% de surface	Surface élémentaire	Connexion hydraulique	% de surface
1				Banancier + Chemins d'eau	Moyenne	34%
2	Chemin d'eau Inter rang	Forte	27%	Reste interrang	Faible	66%
3	Reste interrang	Forte	26 %			
	Banancier + Sillon	Faible	47 %			

Les taux de ruissellement varient de 5 à 10% pour les petites pluies et augmentent pour les événements intenses (jusqu'à 30%).

D'autre part, le mode actuel de gestion des bananeraies est basé sur la seule exportation de la partie commercialisable (le régime) qui représente 50% de la matière sèche totale. Des restitutions notables en biomasse et volume sont en conséquence possibles et se traduisent par des pratiques de paillage dès la fin du premier cycle. Lorsque ces restitutions occupent l'ensemble des interrangs, les taux de ruissellement sur les faibles pluies sont réduits de moitié et font de la bananeraie une culture particulièrement conservatrice des eaux et des sols. En revanche, un paillage réalisé 1 rang sur 2 ne montre pas d'effet significatif sur la limitation du ruissellement. D'autre part, l'incidence des états de surface sur les taux de ruissellement n'est plus discernable pour les événements pluviométriques intenses (plus de 11 mm à des intensités moyennes dépassant les 20 mm/h) en liaison avec l'apparition d'un ruissellement généralisé en parcelle.

Figure 5 : volumes drainées par classe de pluie : effet de la parcelle et de la position



1.2.3. Drainage

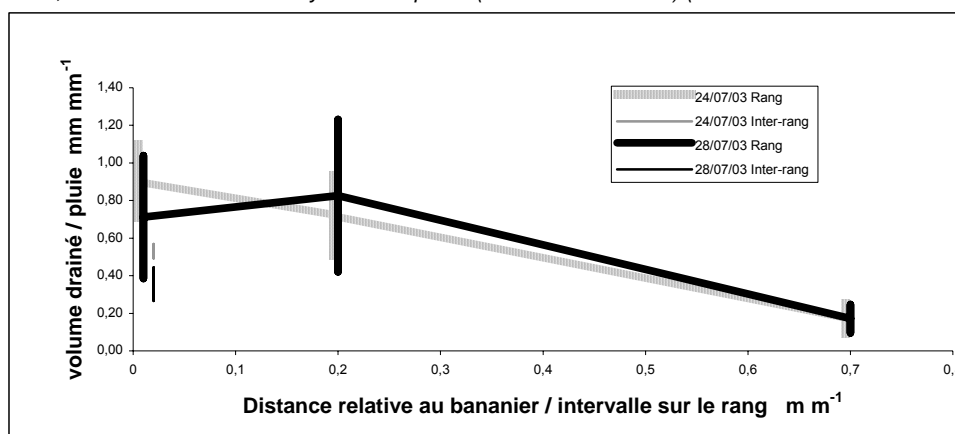
Le drainage mesuré en 2001 et 2002 à l'aplomb des bananiers est supérieur à celui de l'interrang (tableau 3 – figure 7) ; en particulier le drainage d'eau libre (gravitaire), qui représente l'eau circulant rapidement, est très faible dans l'interrang. Les écoulements mesurés à l'aide du second dispositif en 2003 (figure 7) confirment l'impact du stem-flow et de sa redirection en surface au pied du bananier : les coefficients de drainage sont maximaux, et peuvent dépasser 1 au pied du bananier ou immédiatement en aval. Les volumes drainés y sont de 2 à 4 fois ceux relevés sous le sol nu de interrang. Enfin, les volumes recueillis plus bas sur le rang, à l'abri du feuillage du bananier d'aval, sont bien inférieurs aux volumes de drainage enregistrés sous sol nu.

Tableau 3 : quantités d'eau totales recueillies (en mm) dans les lysimètres en parcelle sillonnée et non sillonnée à l'aplomb du bananier et dans interrang pour les cumuls pluviométriques supérieurs à 10 mm du 10/09/01 au 31/10/01 (814 mm de pluies).

	Eau de capillarité		Eau libre	
	Bananier	Inter-rang	Bananier	Inter-rang
Sillonnée	1792	500	312	16
Non sillonnée	903	487	217	10

Figure 7 : Distribution des coefficients apparents de drainage obtenus sur lysimètres à mèches (0.45 x 0.45 m², z = 0.7 m) en fonction de leurs positions relatives aux bananiers

A ces dates, distance / intervalle = 0.2 bénéficie du stem flow redirigé en aval, =0.7 se trouve sous le feuillage du bananier d'aval ; interrang n'est pas couvert par le peuplement. Le coefficient de ruissellement à la parcelle le 28/07/03 est supérieur à celui du 24/07/03, tout comme l'intensité moyenne des pluies (37 contre 13 mm h⁻¹) (Thèse en cours de J. Sansoulet)



Ces résultats, à rapprocher de la redistribution de l'eau de pluie par le bananier, laissent présager de départs préférentiels des éléments solubles (pesticides et engrais) épandus au pied des bananiers au-delà de la zone racinaire alors que l'interrang participe peu à ce phénomène. Ainsi les éléments solubles sont susceptibles soit d'atteindre les nappes et de participer à leur pollution soit d'être stocké dans les horizons profonds du sol, avec le risque d'alimenter une pollution chronique par relargage progressif au cours du temps.

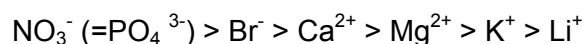
2. Elution des ions dans les andosols

(Cabidoche, Cattan, Razan + thèse Sansoulet + stage CNEARC Malaval)

Même si les interactions mises en oeuvre dans le cas des éléments minéraux diffèrent du cas des molécules pesticides, le raisonnement des pollutions chroniques des eaux à partir des andosols, procède pour partie des mêmes mécanismes : il s'agit d'une « fuite » de molécules en solution dans les eaux de drainage, échappées d'un stock sorbé, non seulement dans les couches superficielles riches en matières organiques, mais aussi dans les couches profondes et les sols enfouis riches en allophane. Ainsi, étudier attentivement les flux d'ions en solution dans les eaux de drainage et de ruissellement, aidera à comprendre, via des analyses peu coûteuses, les flux précoces après épandage de toute molécule soluble, et les flux secondaires issus de la désorption.

2.1 Elution des ions en colonnes de sol

Les éluions ioniques obtenues sur colonnes de sols ont montré le caractère inhabituel des mécanismes de sorption ionique dans les andosols, liés à la coexistence de capacités d'échange anionique et cationique en proportion variable selon le pH. Le bilan CEA-CEC dépend du pH et de la teneur en matière organique : la CEC prédomine dans les horizons A, la CEA dans les horizons B, même si A avait été chaulé. La « préférence ionique » de sorption de l'allophane à pH acide, obtenue par élution en colonnes, est inhabituelle :



Les nitrates sont retenus (figure 8), alors que le potassium est un soluté presque passif. Pour les horizons (B), on a observé une concentration décroissante de NO_3^- dans l'éluat, et donc une détention croissante, quand le pH décroît. Lors des éluions au LiBr, on a obtenu un léger déplacement du NO_3^- sorbé par Br^- : dans les andosols, les charges variables autorisent une sorption anionique croissante avec l'abaissement du pH. Les éluions ont été rapprochées pour éviter une interférence des minéralisations.

Le bromure de lithium ne peut être utilisé comme traceur dans les andosols selon les hypothèses habituelles en hydrologie, où Li^+ simule un cation hautement sorbable, et Br^- un anion soluté passif : ici lorsque le pH est en dessous du point isoélectrique, Br^- est nettement mieux sorbé que le Li^+ (figure 9).

Figure 8 : Elution à l'eau ou avec une solution de LiBr sur des colonnes d'andosol non remaniées (horizons A et B), entre 2 et 8 volumes élués / volume poral.

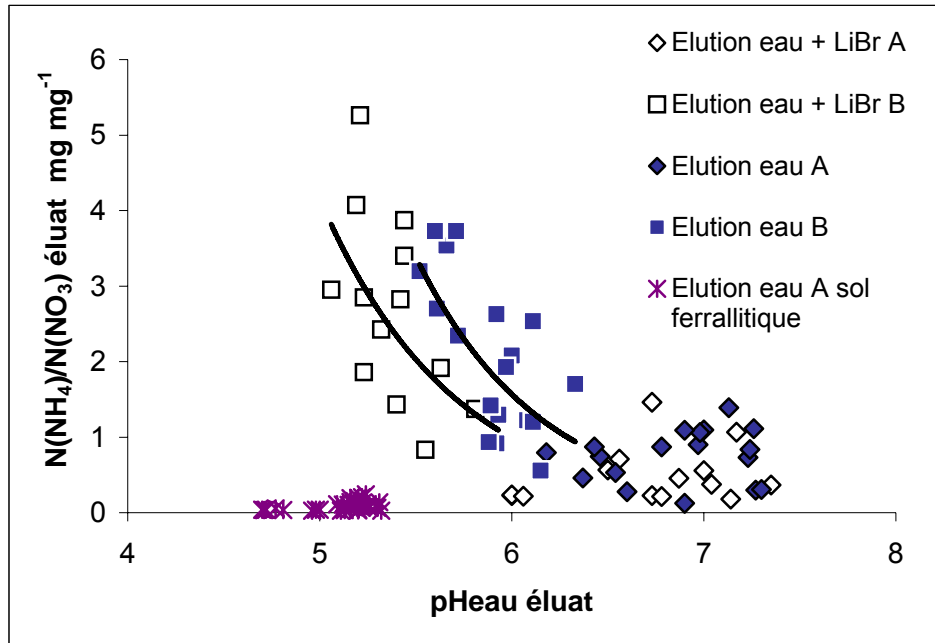
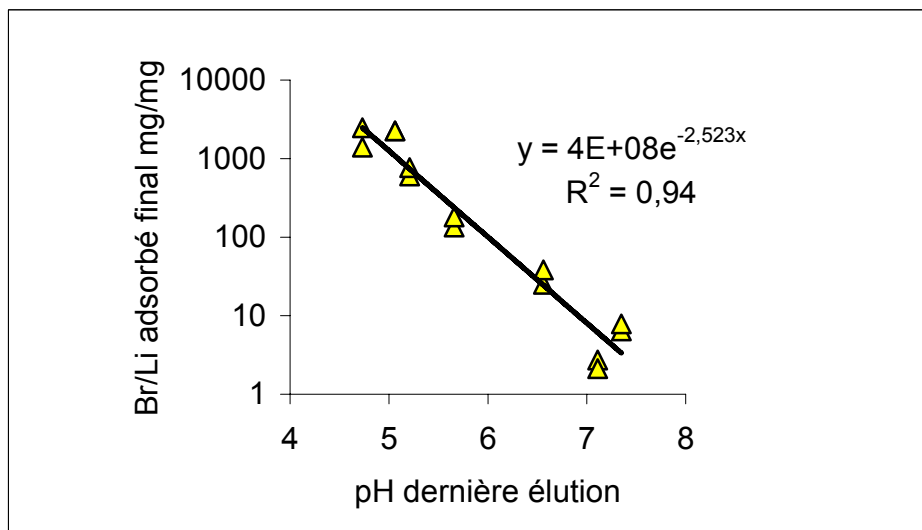


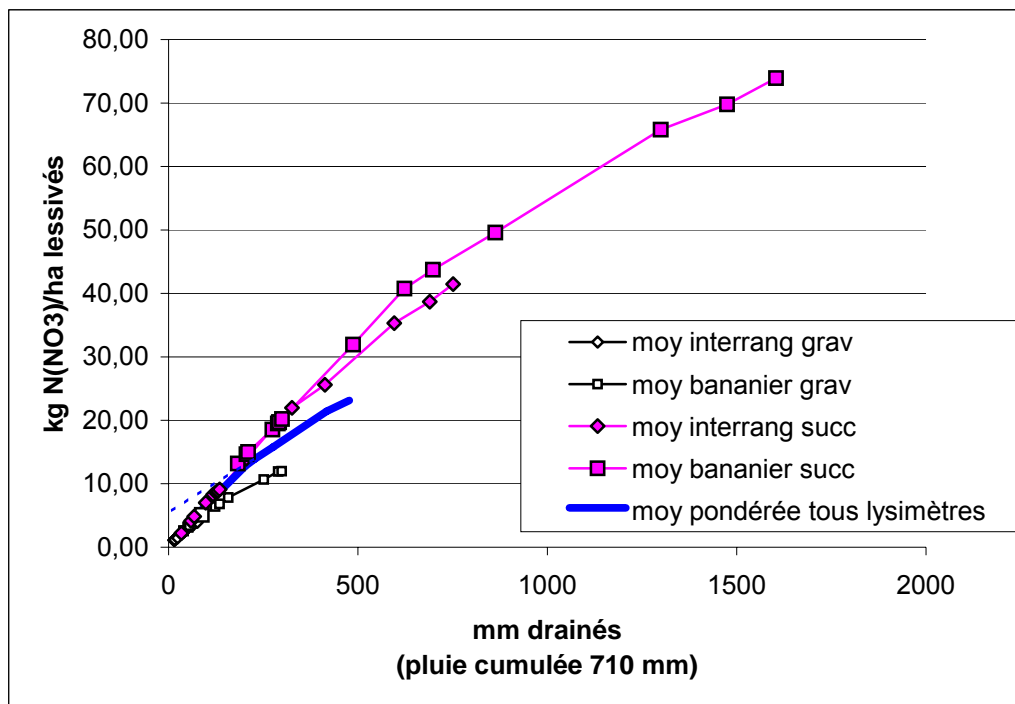
Figure 9 : Sorption croissante du Br^- lorsque le pH s'abaisse, dans les colonnes d'horizon (B) (Br/Li en entrée = 11.4)



2.2 Elution des ions dans les eaux de drainage

Les analyses des eaux de drainage *in situ*, exhaustivement collectées en mars et avril 2002, ont confirmé les comportements observés en colonne : les horizons profonds sorbent des nitrates et ne retiennent pas le potassium.

Figure 10 : élution moyenne des nitrates, pondérée sur lysimètres gravitaires (2/3) et à suction (1/3) pour D=P-R-ETR(3mm/j). Période mars -avril 2002 après apport de 50 kgN/ha.



La figure 10 illustre l'exportation des nitrates durant deux mois suivant un apport de 50 kg $N(NO_3^-)$ ha^{-1} et sous 710 mm de pluviométrie correspondant à un drainage estimé de 510 mm. Les concentrations maximales de 5,5 mg/l (soit 24 mg/l de nitrate) en suintement (« gravitaire ») et 6,6 mg/l (soit 30 mg/l de nitrate) sous suction ont été du même ordre. Elles correspondent à une première phase après apport, au cours de laquelle on a pu avoir une contribution directe des nitrates apportés. Les pentes d'élution presque identiques obtenues sous bananier et interrang dans cette première phase, alors que les apports ont été localisés, suggèrent une redistribution précoce de l'engrais solubilisé à la surface du sol. Les quantités d'azote exportées par drainage, deux fois plus élevées sous bananiers que sous interrang, sont plus en relation avec les flux d'eau transférés qu'avec la localisation des apports. On notera cependant que cette concentration est à peine supérieure à la concentration moyenne de 4 mg/l obtenue ensuite par élution du stock sorbé, sans flush visible de minéralisation. Le phénomène de désorption du stock préexistant est donc prédominant, on peut estimer par l'ordonnée à l'origine de la deuxième phase que seuls 5,4 kg $N(NO_3^-)$ ha^{-1} ont été lessivés sur les 50 récemment apportés. Les 17,7 restants sur les 23,1 lessivés proviendraient de la désorption du stock préexistant. Du reste, ce stock est considérable : des profils moyens diachroniques réalisés en 2001 ont fait apparaître un stock permanent de 80 à 1000 kg $N(NO_3^-)$ ha^{-1} sur 80 cm de profondeur.

Le rapport N/K des apports mensuels localisés a été constant (0,6 kg kg^{-1}) ; sous bananier, il est tombé à 0,4 dans les eaux de drainage sous suction (2,5 fois la pluviométrie) et à 0,35 en drainage gravitaire (0,5 fois la pluviométrie). Sous interrang ce rapport a été de 0,23 et 0,14 respectivement. Ceci confirme que l'azote est à la fois moins dispersé et moins dissipé que le potassium dans les andosols. Cette tendance est stable lors des premières élution après application de KNO_3 seul et ne résulte donc pas de la réorganisation de l'azote.

La sorption précoce des nitrates et au contraire le caractère passif du potassium sont particulièrement visible lors du premier drainage après apport, seule phase dans laquelle le lessivage partiel de l'apport récent localisé est visible : le sol à l'aplomb du bananier perd alors 1,5 kg $N(NO_3^-)$ contre 9 kg K ha^{-1} , tandis qu'à l'aplomb de interrang il perd respectivement 0 kg $N(NO_3^-)$ ha^{-1} et 1,1 kg K ha^{-1} . Cette perte immédiate après l'apport sous le bananier représente donc seulement 3% de l'azote épandu contre 10 % du potassium apporté.

2.3 Concentration ioniques dans les eaux de ruissellement

Les concentrations mesurées ont montré un pic de concentration de 7.2 mg N(NO₃)/l, immédiatement après apport, pour la parcelle couverte de résidus, dont le ruissellement était de 0.2 mm pour une pluie de 16 mm. Cette valeur de ruissellement était la plus petite enregistrable, on peut raisonnablement considérer qu'elle a provoqué une première dissolution avec une concentration maximale (32 mg/l de nitrate). Pour toutes les autres dates, les concentrations des eaux de ruissellement en N(NO₃) sont restées inférieures à celles des eaux de drainage, et les quantités exportées très faibles au regard de celles exportées par drainage.

2.4 Bilan de l'azote nitrique et du potassium

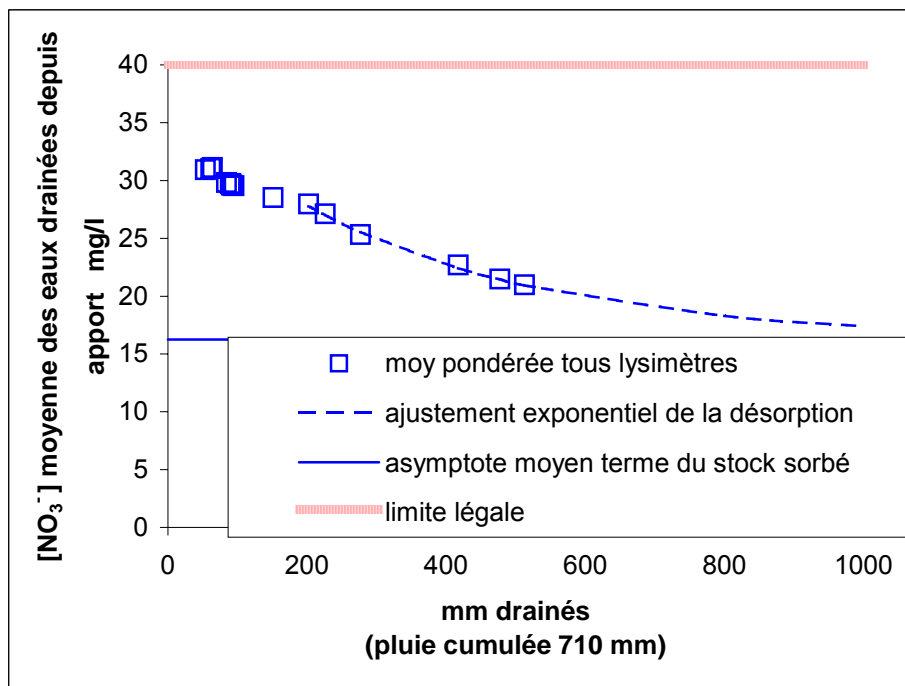
Les termes du bilan apparent sur cette période sont résumés par le tableau 4 : le rapport entre les pertes totales et l'apport fertilisant est de 49% pour les nitrates, et de 97% pour le potassium.

Tableau 4 : Bilan des entrées / sorties en drainage mesurés entre deux fertilisations azotées + potassiques, après 2 mois ayant reçu 710 mm de pluviométrie et fourni 510 mm de drainage (mars-avril 2002)

	Fertilisation	Export par ruissellement	Lessivage immédiat de l'apport	Lessivage différé de l'apport	Lessivage du stock préexistant	Total pertes
N (kg ha ⁻¹)	50	0.5	1.5	4	18.5	24.5
K (kg ha ⁻¹)	80	1.5	8	4	64	77.5

Ces résultats confirment les hypothèses émises dans l'expertise sur l'état de la pollution azotée dans les DOM pour le MEDD (ex MATE) (Cabidoche, 2001), et explicitées dans le cadre du Programme Commun « Systèmes irrigués » (Cabidoche et al, 2003) : malgré une sur-fertilisation azotée dans les bananeraies sur andosols, l'importance des flux de ruissellement et de drainage, et l'amortissement par la sorption anionique maintiennent des flux sortants vers les rivières et les nappes d'une concentration acceptable en nitrates (figure 11).

Figure 11 : Concentration moyenne en nitrates des eaux drainées, depuis la date d'apport de 50 kgN ha^{-1} ($221 \text{ kgNO}_3 \text{ ha}^{-1}$) en fonction du drainage cumulé
Période mars (apport)-avril 2002. Moyenne pondérée sur lysimètres gravitaires (2/3) et à succion (1/3) pour D=P-R-ETR(3mm/j)



Le risque de pollution azotée des nappes à partir des bananeraies sur andosol est donc minime, malgré des apports excédant nettement les besoins (5 fois dans cette expérimentation). Il est cependant souhaitable de réduire les apports azotés, les stocks de nitrates sorbés dans des andosols fertilisés depuis longtemps devant contribuer largement à la nutrition azotée des cultures. En revanche, la fertilisation potassique doit être d'autant plus soutenue que les stocks organiques et le pH des sols sont bas. Il n'y a pas *a priori* de risque environnemental associé à ces pertes de potassium.

Tous les exploitants enquêtés ayant des parcelles sur andosols ont eu communication des résultats de leurs analyses parcellaires, assorties de recommandations de fertilisation - chaulage. Une réorientation des pratiques de fumure vers la diminution des fréquences d'apport d'azote et le recentrage sur la fertilisation potassique, en évitant les chaulages massifs a été en général conseillée.

3. Dispersion des pesticides à l'échelle parcellaire

(Cattan, Cabidoche, Louchart, Voltz, Barriuso, Onapin + VCAT Simon/Lacas + stage Champoiseau + post-doctorant Rousseau)

3.1 Problématique

Il s'agit, à l'échelle de la parcelle et de son système de culture, de mettre en évidence les facteurs régissant la dispersion des molécules pesticides au sein des parcelles cultivées. Ils sont liés aux modalités d'adsorption et de désorption des molécules dans les sols ainsi qu'aux cinétiques d'évolution des concentrations des molécules dans les eaux de drainage et de ruissellement.

L'adsorption et la désorption du cadusafos sur andosol a fait l'objet d'une étude particulière en laboratoire. D'autre part une expérimentation de terrain a permis de suivre la dispersion du cadusafos dans les eaux de ruissellement et de drainage ainsi que dans les sols après un épandage réalisé en parcelle.

3.2 Comportement des pesticides dans le sol

(Barriusio, INRA Grignon)

3.2.1. Protocole

L'adsorption et de la désorption du cadusafos sur des andosols de la Guadeloupe a été caractérisée sur des échantillons de sol prélevés à la station de Neufchâteau dans les horizons A et B à partir de solutions aqueuses de cadusafos marqué au ¹⁴C. Les mesures d'adsorption et de désorption se font selon la méthode OCDE 106. Le comportement des sols étant susceptible de varier en fonction des niveaux de dessiccation auxquelles ils ont été soumis, les études ont été réalisées sur sol humide et sur sol préalablement séché.

Les isothermes d'adsorption sont réalisés à partir de 5 solutions de concentration croissante en cadusafos (de 0.45 à 11.13 µg/l). Chaque solution est mise en contact avec le sol ayant subi une dispersion préalable. Après agitation durant 24h, le sol est séparé de la solution à l'équilibre par centrifugation. La concentration de la solution à l'équilibre est calculée d'après sa teneur en ¹⁴C.

Les isothermes de désorption sont établis à partir des échantillons de sols qui ont été en contact avec la solution de cadusafos la plus concentrée. Après l'étape d'adsorption, le surnageant est prélevé (environ 8,5 mL) et remplacé par un volume identique de CaCl₂ 0,01 M. Après 24 h d'agitation par retournement, la séparation du sol contenant le cadusafos restant adsorbé et de la solution à l'équilibre, contenant le cadusafos désorbé, se fait par centrifugation. La concentration de la solution à l'équilibre est calculée d'après sa teneur en ¹⁴C. La quantité restant adsorbée est calculée par différence entre la quantité adsorbée initialement et la quantité désorbée. Cinq désorptions successives sont ainsi réalisées en remplaçant le surnageant avec du CaCl₂ 0,01 M. Puis, une extraction est faite en remplaçant le surnageant par du méthanol.

3.2.2. Résultats

Les isothermes d'adsorption peuvent être décrites par une fonction du type :

$$(x/m) = K_d C_e$$

(x/m) est la quantité de cadusafos adsorbé (en mg/kg de sol sec)

C_e est la concentration du surnageant en cadusafos (en mg/L)

K_d est un coefficient de distribution entre les phases solide et liquide

Tableau 5 : valeur du coefficient de partage sol/eau (K_d) du cadusafos dans les horizons A et B de deux andosols pris sur les parcelles NT et PS de la station de Neufchâteau

		Sol NT Horizon A	Sol NT Horizon B	Sol PS Horizon A	Sol PS Horizon B
Sol humide	K _d (L/kg)	8.11	5.81	6.77	4.64
	(r ²)	(0.99)	(0.92)	(0.97)	(0.97)
Sol séché	K _d (L/kg)	10.52	8.88	10.29	7.42

Les valeurs de K_d, obtenus par régression linéaire à partir des mesures expérimentales de (x/m) et de C_e, sont indiquées tableau 5. L'adsorption du cadusafos est supérieure dans les échantillons prélevés dans les horizons de surface A, par rapport à celle qui est mesurée sur

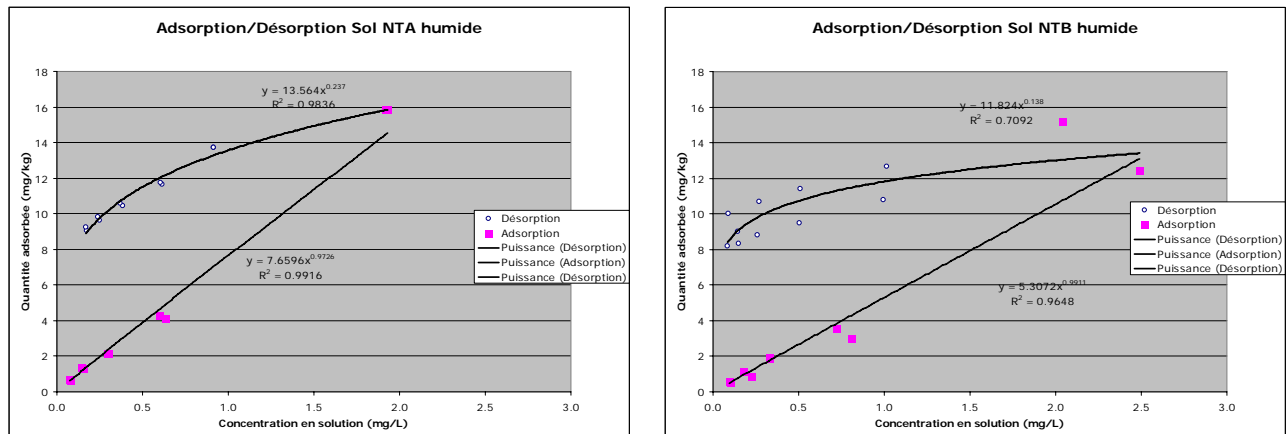
les échantillons prélevés dans les horizons B. L'adsorption est systématiquement supérieure quand le sol a été préalablement séché à l'air avant de faire la mesure de l'adsorption.

Les valeurs de Kd du tableau précédent permettent le calcul des valeurs correspondantes de Koc, coefficient d'adsorption normalisé par la teneur en carbone organique des sols (%Corg) :

$$Koc = Kd \ 100 / \%Corg$$

Pour des valeurs mesurées de %Corg de 5.8% et de 3.2% respectivement dans les horizons A et B, les valeurs de Koc pour les sols humides sont en moyennes de 128 pour l'horizon A et de 163 pour l'horizon B, se rapprochant des valeurs minimales reportées dans la littérature.

Figure 12 : Isothermes d'adsorption et de désorption pour le sol NT à Neufchâteau



Les isothermes de désorption montrent que l'adsorption n'est pas réversible (figure 12). Dans tous les cas on assiste à une hystérésis très importante par rapport à l'adsorption. Le rapport des exposants des régressions (tableau 6) permet par ailleurs de quantifier le degré d'hystérésis : plus ce rapport est proche de l'unité, plus l'adsorption est réversible.

Tableau 6 : rapport des exposants des régressions des isothermes d'adsorption et de désorption

Sol	NT A	NT B	PS A	PS B
Humide	4.1	7.2	4.4	5.1
Séché	3.0*	3.3*	3.0*	3.2*

Les quantités de cadusafos désorbées après 5 désorptions avec la solution aqueuse de CaCl₂ représentent entre 34 et 45 % du cadusafos adsorbé sur le sol initialement humide. Les pourcentages désorbés sont toujours supérieurs dans les horizons A par rapport aux horizons B. Ces pourcentages de désorption sont systématiquement inférieurs dans les sols ayant été conservés humides, par rapport aux sols ayant été séchés. Dans ce cas, le pourcentage de désorption varie entre 51 et 56 % du cadusafos initialement adsorbé.

Après les désorptions, une extraction avec du méthanol permet la récupération de 11 à 14 % supplémentaire du cadusafos adsorbé dans les sols humides des horizons de surface, et 5 et 8 % dans les horizons B. Le pourcentage extrait avec du méthanol est supérieur dans les sols initialement séchés (entre 12 et 17 % du cadusafos adsorbé), et cette proportion est toujours plus importante dans les horizons A que dans les horizons B. Une extraction supplémentaire en conditions alcalines (NH₄OH) ne permet de récupérer que de très faibles proportions de cadusafos adsorbé.

Finalement, dans les sols ayant conservé leur humidité initiale avant le traitement avec du cadusafos, 43 % du cadusafos adsorbé n'est pas récupéré dans les horizons A et 51 à 59 % n'est pas récupéré dans l'horizon B. Le pourcentage de récupération augmente dans les sols

ayant été séchés avant leur traitement avec le cadusafos. Dans ces sols, entre 30 et 33 % du cadusafos initialement adsorbé n'est pas désorbé ni extractible.

En conclusion, les sols ont une forte capacité de stockage du cadusafos. Dans les conditions habituelles de traitement sur sol humide, le stock sorbé est difficilement extractible. Ce stock du sol, dont il est probable qu'il soit soustrait à la biodégradation, peut être à l'origine d'un relargage progressif des matières actives dans le milieu alimentant de fait une pollution chronique à moyen voire long terme. Il représente également une source de pollution possible pour les cultures venant en rotation avec la banane.

3.3 Evaluation d'un bilan pesticide à l'échelle parcellaire

3.3.1. Protocole

Au champ, un traitement nématicide à base de cadusafos a été effectué le 20 septembre 2001 sur les deux sous-parcelles T+ et T- du dispositif présenté précédemment. Après avoir préalablement échantillonné les eaux de ruissellement et de drainage, des prélèvements ont été réalisés sur une base journalière pour les eaux de ruissellement, et après dépassement d'un cumul pluviométrique de 40 mm pour les eaux de drainage. 427 échantillons d'eau et 144 de sol ont été analysés pour la concentration en pesticide.

Le 22 octobre 2002 trois traitements nématicides ont été effectués à base de cadusafos, de fosthiazate et d'aldicarbe afin d'observer les différences de comportement des molécules après épandages ; 259 échantillons d'eau et 192 de sol ont été expédiés pour analyse des 3 molécules.

3.3.2. Stockage des pesticides dans le sol

Tableau 7 : concentration du cadusafos dans le sol ($\mu\text{g/l}$).

	Sillon			Trou		
	Amont	Aval	Interrang	Amont	Aval	Interrang
Pré-épandage	3,8	3,9	3,4	4,1	1,6	2,1
Moyenne des prélèvements	37,8	114,7	6,0	26,0	68,5	26,5

L'analyse pré-épandage (tableau 7) montre l'existence d'un stock pesticide dans le sol plus d'un an après le dernier traitement. Les différences spatiales de concentrations après épandage rendent compte des modes de circulation de l'eau au sein des parcelles : fortes valeurs en aval des bananiers ; opposition entre faibles valeurs dans l'interrang et fortes valeurs sur le rang (aval et amont bananier) pour la partie sillonnée en raison de la compartimentation des écoulements d'eau (transports localisés dans le sillon alors qu'ils se répartissent en parcelle pour la partie plantée au trou). Enfin, l'estimation du temps de demi-vie (DT50) de la molécule a été réalisée sur la moyenne des échantillons pris entre 0 et 5 cm dans le sol. Les résultats fournissent des valeurs de 7 à 17 jours pour la DT50, très inférieurs aux 45 jours indiqués dans la littérature (AGRITOX).

3.3.3. Dispersion des pesticides dans les eaux de drainage

Tableau 8 : exportations cumulées de cadusafos en différentes situations (parcelle sillonnée et plantée au trou, haut et bas de parcelle, bananier et interrang) sur la période de mesure en fonction du type de drainage (rapide ou total)

	Sillon				Trou			
	Bas		Haut		Bas		Haut	
	Bananier	Interrang	Bananier	Interrang	Bananier	Interrang	Bananier	Interrang
Exportations par Lysimètre (mg/m ²)	42,4	0,3	5,8	1,0	3,6	0,4	2,1	1,4
ExDR / ExDT ¹	109%	10%	44%	14%	40%	7%	40%	5%
DR / DT ²	15%	7%	11%	5%	24%	4%	15%	5%

¹part des exportations de cadusafos dans le drainage rapide (ExDR) par rapport aux quantités totales exportées dans le drainage total (ExDT)

²part du drainage rapide (DR) dans le drainage total (DT) mesuré sur la période.

L'essentiel des exportations du cadusafos s'effectue dans les eaux de drainage récoltées à l'aplomb du bananier (tableau 8). Les écarts bananiers/interrangs sont très variables d'un site à l'autre, en relation avec la situation du lysimètre par rapport aux chemins de circulation des eaux. Sous bananier, 40% des exportations au minimum s'effectuent dans les eaux de drainage rapide qui ne représentent qu'au maximum 24% du volume total de drainage. La mobilisation du cadusafos est en conséquence liée à la circulation rapide des eaux dans le sol. L'essentiel des exportations correspond à un pic de concentration observé après épandage et d'une durée de 15 jours environ.

L'impact de la localisation des traitements dans les zones à fort drainage (pied du bananier) est tout à fait remarquable. On peut supposer que la dispersion dans les interrangs limiterait presque totalement les départs en profondeur vers les nappes. La compartimentation des écoulements (sillons de bananier) semble favoriser l'accumulation des produits et leur départ dans les horizons profonds du sol. L'association sillon/localisation au pied bananier apparaît donc la plus néfaste alors l'association sillon/délocalisation serait celle qui favoriserait la conservation des phytosanitaires in situ (absence pratiquement totale de produits phytosanitaires dans les zones à drainage uniquement matriciel). La redistribution de l'eau et sa circulation dans toute la parcelle dans le cas de la plantation au trou diminuerait l'impact de la localisation des traitements ; en corollaire, des traitements délocalisés pourraient être tout de même mobilisés.

D'autre part, les valeurs d'exportations semblent plus fortes sur Sillon ; de fait, les exportations sous bananiers dans la parcelle trou sont faibles : en conséquence la seule application des produits au pied du bananier n'implique pas leur mobilisation par l'eau du stem flow ; d'autres facteurs peuvent jouer. Ainsi le flaquage en amont du pseudo-tronc observé sur sillon est susceptible de provoquer la solubilisation et le lessivage des produits épandus à proximité en revanche, l'absence de ce type de zone (bananier en position locale haute au-dessus du sol) peut ne pas générer d'exportation préférentielle au pied du bananier.

3.3.4. Dispersion des pesticides dans les eaux de ruissellement

Si globalement les volumes d'eau ruisselés sur la parcelle plantée au trou sont plus importants que sur celle sillonnée, la configuration est inverse juste au moment de l'épandage et durant le pic de concentration, très court (5 jours) qui suit. Il en résulte des exportations en cadusafos de même ordre de grandeur sur les deux parcelles (de l'ordre de 10 g/ha). D'autre part, les volumes ruisselés lors du pic sont beaucoup plus faibles que par la suite, les pertes étant de fait diminuées (contingence de la pollution et du ruissellement au moment des apports).

3.3.5. Conclusion

Les exportations sont liées à la circulation rapide des eaux (ruissellement et drainage). Celles liées au ruissellement sont élevées (22 à 50% des quantités exportées par les eaux) par rapport aux volumes ruisselés (1 à 5% de la pluie) et ont de plus été minimisées de part les faibles niveaux de ruissellement durant la période d'épandage. Cette constatation pourrait justifier la mise en place d'une alerte météorologique au traitement.

Le stock du sol à la fin de l'expérimentation représente de l'ordre de 1% de la matière active épandue (6kg de matière active/ha). Le total maximum exporté ne dépasse pas 2% des apports.

Du point de vue des pratiques agricoles, la redistribution de la pluie à la base du pseudo tronc où sont épandus les intrants, est à l'origine d'un drainage rapide à forte capacité d'entraînement des éléments solubles, accroît les pertes en cadusafos et les risques de pollution par pic. La délocalisation des épandages apparaît toujours comme une possibilité de diminuer les risques d'exportation des produits phytosanitaires.

La modification des pratiques d'épandages (épandre sur toute la surface, en évitant une localisation au pied du bananier, comme actuellement pratiqué) a été préconisée notamment dans le cas des engrais. L'Union des Industries de Produits Phytosanitaires, informée des résultats exposés au paragraphe 2.2, suite à une visite de son ancien Président, Mr Charlot, a immédiatement réagi au risque d'entraînement d'intrants solubles, s'ils sont appliqués au pied du faux-tronc, en modifiant les recommandations d'épandage sur les étiquettes : « ne pas épandre à moins de 40 cm du pied ».

Tableau 9 : termes du bilan de cadusafos à la parcelle

		Drainage	ruissellement	Stock sol
Volume d'eau (% du volume pluviométrique)	Sillon	79%	1%	-
	Trou	75%	5%	-
Quantités de cadusafos (g/ha)	Sillon	57 ; 17**	10	46
	Trou	16 ; 8**	10	40

* en l'absence d'algorithme d'intégration, le drainage total parcelle est difficile à évaluer à partir des données des lysimètres ; il est ici calculé par défaut en prenant ETM = 20% de la pluie.

** les valeurs maximum et minimum obtenues dans les eaux de drainage sont indiquées ; ces quantités représentent une moyenne pondérée (par les surfaces) des mesures effectuées sous bananier (coeff. de 1.28) et dans l'interrang (coeff. de 9.8).

3.4 Recherche d'une modélisation de la cinétique de concentration en cadusafos dans les eaux de drainage

La modélisation de la cinétique de concentration en cadusafos dans les eaux de drainage a été recherchée à partir du modèle HYDRUS 1D. L'objectif de cette première étape a été de tester les différentes configurations du modèle qui permettent au mieux de reproduire i) la courbe d'éluion en pesticide expérimentale et ii) l'évolution des profils de concentrations observées dans les sols. Les simulations effectuées permettent de rendre compte de façon satisfaisante des valeurs observées en lysimétrie. La prise en compte des flux préférentiels dans le transport de pesticide est inévitable ; elle se fait par le biais d'un modèle mobile-immobile, avec une teneur en eau immobile élevée, la majeure partie de l'écoulement se faisant dans 20 % de la porosité totale.

Ces recherches sont poursuivies, d'autres modèles étant en cours d'exploration. Elles constituent les moyens de généralisation des résultats observés.

PARTIE 3. QUANTIFICATION DES TRANSFERTS D'EAU ET DE PESTICIDES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

(Cattan, Cabidoche, Louchart, Voltz, Onapin + VCAT Simon/Lacas/Lefevre/Charlier)

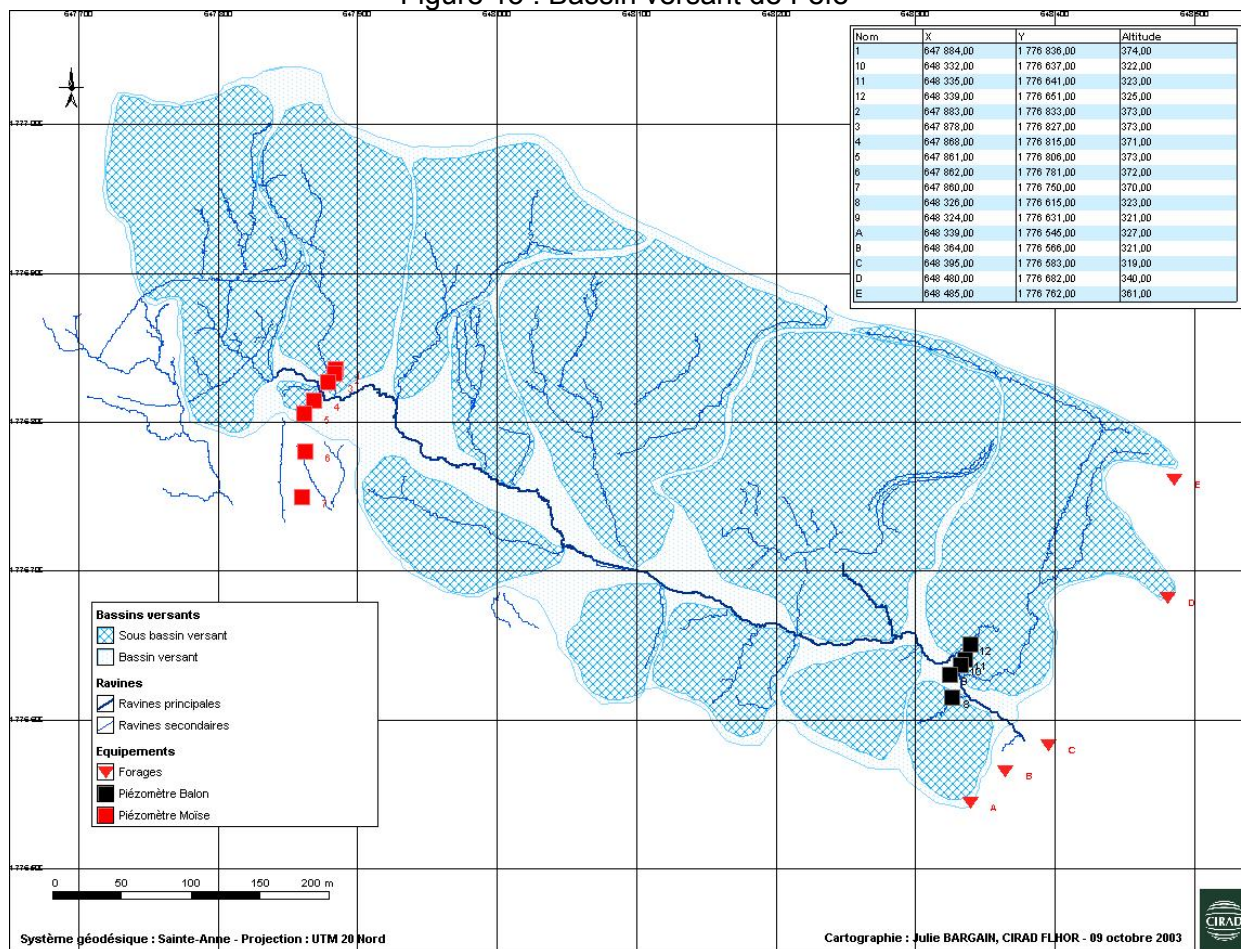
1. Problématique

Le bassin constitue l'échelle intégratrice d'évaluation des impacts environnementaux ; l'état de contamination des eaux de surface ou de profondeur, résultant du fonctionnement hydrologique du bassin, en constitue un des indicateurs les plus évidents. Il apparaît en conséquence nécessaire :

- d'une part de caractériser le fonctionnement hydrologique du bassin d'étude à travers la formalisation des relations existant entre la pluie, l'alimentation des nappes souterraines et l'alimentation de la rivière ;
- d'autre part d'évaluer l'incidence d'un traitement phytosanitaire par les agriculteurs sur la pollution des différents compartiments d'eau au sein du bassin compte tenu des connaissances acquises à la parcelle.

2. Réalisation

Figure 13 : Bassin versant de Fédé



La zone de Fédé qui constitue un sous-bassin de la rivière Pérou a été retenue pour l'étude (figure 13). Le bassin versant de Fédé (20 ha environ) est cultivé par 4 agriculteurs. Il est bordé au nord par la crête d'un morne (colline) aux fortes pentes (plus de 30% sur environ 125 m de longueur), et au sud par une falaise plongeant vers un affluent de la rivière Pérou. Une ravine principale draine le bassin sur une distance d'environ 0,7 km, du haut au bas du bassin où un

dispositif de mesure de débit a été installé. Les altitudes varient entre 320 et 420 m. Les différentes étapes de caractérisation du bassin ont porté sur :

- le recensement des états de surface et une typologie associée ;
- la caractérisation hydrodynamique des sols (infiltration, Densité apparente, courbes de rétention...);
- l'établissement de chroniques de débits sur la ravine principale (Photo 5);
- la mise en place d'un réseau de pluviomètres (4 sur l'ensemble du bassin) ;
- le relevé altimétrique de l'ensemble du bassin par GPS comprenant : le relevé du réseau hydrographique principal et secondaire ; le relevé des contours parcellaires ; la réalisation d'un modèle numérique de terrain ;
- la caractérisation et le suivi des parcelles (type de culture, couverture au sol...);
- la mise en place de 12 piézomètres (1,5 à 4,5 m) sur deux transects encadrant la ravine, en amont et aval du bassin, à la base du morne ;
 - la mise en place de 5 piézomètres profonds (15 à 50 m) répartis sur un transect d'un sommet d'interfluve à l'autre en bas de bassin, près du déversoir.
 - Le suivi des caractéristiques hydrologiques du bassin (débit, nappes) et le prélèvement hebdomadaire d'un échantillon moyen dans la ravine principale depuis le début 2003.



Photo 5 : déversoir pour la mesure des débits à l'exutoire du bassin

Six prélèvements ont été effectués en rivière au cours de l'année 2001, suivi de 10 au cours du premier semestre 2003.

Un peu plus de sept hectares de banane ont été traités au cadusafos entre le 3 et le 21 octobre 2003. Un échantillon d'eau a été pris dans 16 piézomètres sur les 17 implantés ainsi qu'un échantillon en ravine avant épandage (point 0). Des prélèvements hebdomadaires en rivière, nappes et sols sont prévus jusqu'en janvier 2004.

3. Résultats

3.1 Caractéristiques marquantes de la pluie, du débit et des nappes

En ne considérant que les périodes sans crue, on distingue d'après le débit de base de la ravine à l'exutoire deux périodes dans l'année : une période des basses eaux qui s'étend de février à septembre 2003 quand le débit de base de la ravine à l'exutoire reste inférieur à 5 L/s et la période des hautes eaux qui s'étend d'octobre 2003 à janvier 2004 quand le débit de base y est supérieur.

On note que les événements pluvieux très intenses restent assez fréquents : 12 jours dans l'année dépassent 60 mm de pluie journalière cumulée dont 3 jours au mois de juin et le reste pendant la saison cyclonique.

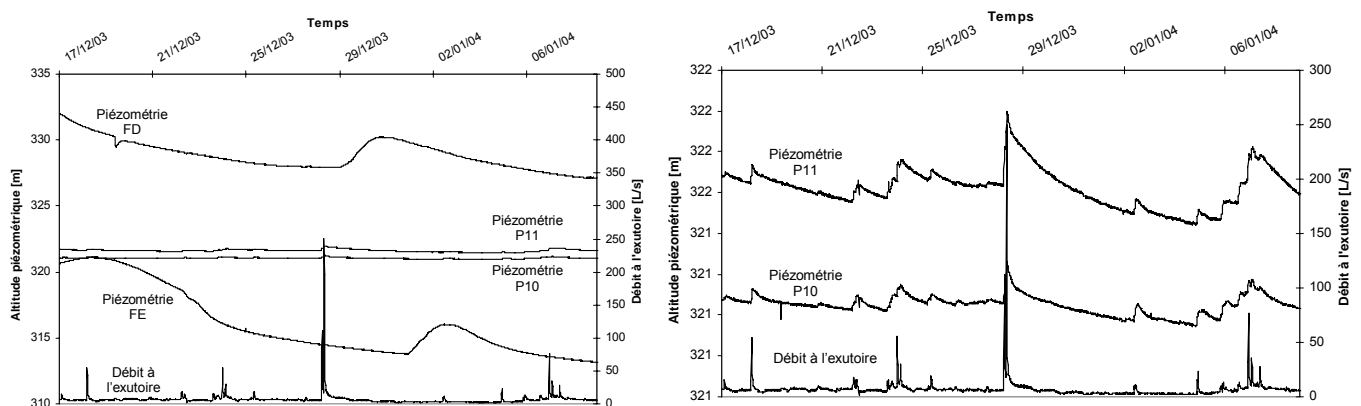
Grâce au réseau de suivi piézométrique mis en place, on peut définir deux comportements distincts de nappe qui nous amènent à différencier deux aquifères à deux géométries et deux dynamiques hydrogéologiques différentes :

- La nappe dite d'accompagnement de la ravine, en relation étroite avec les variations de hauteur d'eau dans la ravine (figure 14). Cette nappe située à très faible profondeur (de quelques décimètres à 4 m de la surface selon l'éloignement latéral à la ravine réagit très rapidement à un épisode pluvieux. Le début de la montée de nappe est quasi instantané après le début de la pluie, le pic de crue est très marqué et la décrue très rapide également. On peut observer une crue de nappe de plus de 1,6 m

d'amplitude avec une vitesse de montée de nappe de 80 cm en 1 heure de temps (crue du 25/10/03). La recharge très rapide peut s'expliquer par la grande porosité des andosols et la vidange de nappe peut être interprétée comme un drainage de la nappe par la ravine, ce qui laisse à penser que la nappe contribue très fortement à la montée du niveau d'eau dans la ravine lors d'une crue sur le bassin.

- La nappe dite profonde observée par l'intermédiaire des forages situés en aval du bassin est observée sur toute la largeur du bassin. Elle se situe bien en dessous de la ravine (environ 5 m en dessous d'après le niveau dans le forage C à proximité de l'exutoire) et les premières données piézométriques qui confirment un battement de nappe très important sur le flanc du morne (supérieur à 24 m à l'aplomb du morne) montrent une absence de réponse rapide après un événement pluvieux, mais plutôt une recharge tamponnée par l'épaisseur de la zone non saturée : on distingue une période de hautes eaux et une période de basses eaux au cours de l'année, mais pas de crues de nappe marquée comme pour la nappe d'accompagnement.

Figure 14 : Exemple d'hydrogramme et de piézométrie sur le bassin versant de Féfé



nappe dite d'accompagnement de la ravine piézomètres P10 et P11
 nappe dite profonde : forages FD et FE
 ravine : débit à l'exutoire

Compte tenu des sites de mise en place des trois transecs piézométriques, on peut faire les hypothèses suivantes :

- la nappe d'accompagnement à la ravine (répartie de part et d'autre de la ravine principale sur toute sa longueur) s'étend sur environ un tiers de la surface du bassin, avec un écoulement chenalissant en étroite relation avec le débit de la ravine.
- sur le bas du bassin, sous la nappe d'accompagnement, s'écoule la nappe profonde avec une crête piézométrique parallèle à la crête du morne mais en milieu de pente décalé 100 m plus au sud. Le sens d'écoulement au nord de cette crête est supposé vers le nord et le sens d'écoulement au sud de cette crête est observé nord-ouest sud-est avec un exutoire qui semble être vraisemblablement la rivière Pérou, en bas de falaise au sud du bassin.

3.2 Schéma de fonctionnement du bassin

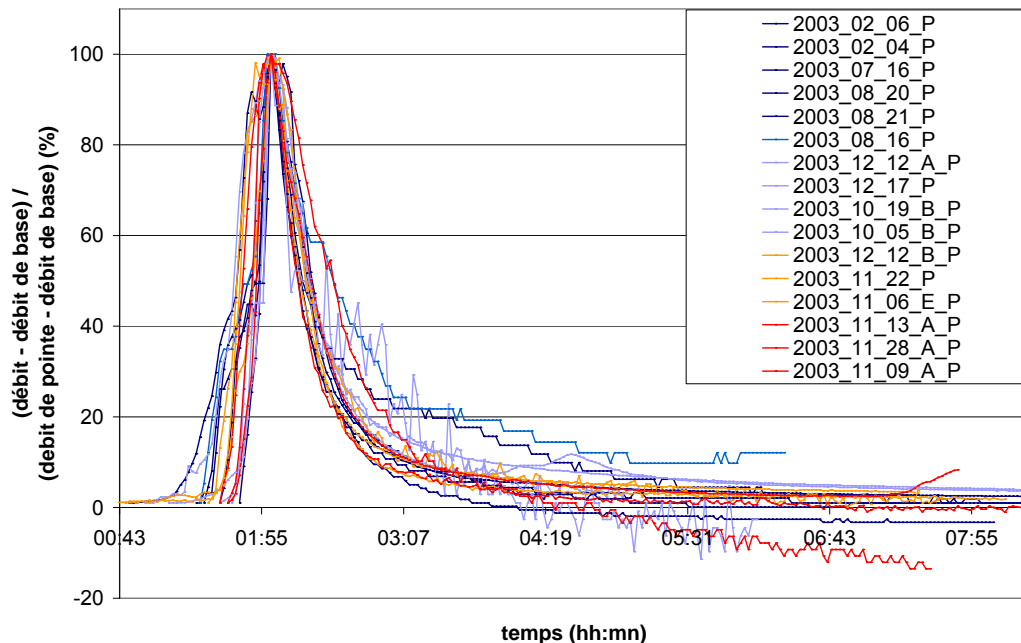
3.2.1. Typologie de crue

La typologie de crue permet de manière graphique d'analyser la morphologie des hydrogrammes de crue qui reflètent les réponses du bassin. Ainsi, la typologie de crue est une première étape dans la compréhension du fonctionnement de bassin pour y caractériser des comportements typiques et atypiques en comparant les hydrogrammes entre eux.

La typologie de crue a porté sur 16 crues monopics, sans bruits parasites sur l'hydrogramme et formées lors de contextes hydriques très différents. La figure 15 présente les 16 hydrogrammes de crue monopics calés sur un même repère pour comparer la morphologie de la montée de crue et de la décrue. Ainsi, sur l'axe des ordonnées le débit de base a été fixé par convention à 1 et le débit de pointe à 100, et sur l'axe des abscisses la date du débit de pointe a été fixée à 02h00. Globalement, on observe une grande homogénéité de la morphologie des hydrogrammes de crue pour des contextes hydrologiques très diverses (grande gamme d'états hydriques initiaux et de pluie cumulée). En s'affranchissant de la valeur du débit de pointe et donc de la quantité d'eau écoulée à l'exutoire, on peut décrire la crue type de bassin pour un événement pluvieux de courte durée :

- Montée de crue : le temps est très court : de 15 à 25 minutes, et la forme sur l'hydrogramme de crue peut s'apparenter à une droite,
- Pic de crue : il est très resserré, de forme parabolique,
- Décrue : la première partie est linéaire, symétrique à la montée de crue par rapport au pic de crue, et donc très rapide. Ainsi, en 20 minutes environ, l'écoulement en ravine a perdu la moitié du débit de pointe atteint par la crue. La seconde partie est une courbe asymptotique au débit de base et peut durer au moins 3 heures encore.

Figure 15 : Calage des hydrogrammes de crue monopics sur un même débit



Seuls trois hydrogrammes se distinguent des autres et peuvent être considérés comme atypiques en raison des très faibles niveaux de crues pour les deux premiers et d'un contexte hydrique initial extrême pour le troisième. De façon générale l'homogénéité des hydrogrammes de crue pour des contextes hydriques très différents nous assure une réponse du bassin identique et donc la mise à contribution d'une même surface de bassin et d'un même volume de réservoir souterrain. Ainsi, tout au long de l'année, le fonctionnement du bassin se caractérise par la mise en jeu du même système hydrologique et de mécanismes de transfert identiques.

3.2.2. Analyse de la relation pluies / débits

L'étude Pluie-Débit sur le bassin s'est réalisée sur les épisodes pluvieux avec crue, soit 121 épisodes sur l'année 2003. Pour chacun d'eux, nous avons calculé le cumul de la pluie ainsi que le volume total écoulé à l'exutoire pendant l'épisode pluvieux. La figure 16 représente la lame d'eau précipitée sur le bassin en fonction de la lame d'eau écoulée à l'exutoire en

différenciant les crues suivant l'état hydrique initial du bassin. Pour une même lame d'eau précipitée sur le bassin, on a une augmentation du volume écoulé quand l'état hydrique initial du bassin augmente. A partir d'un certain seuil pluviométrique, la relation pluie / débit est assimilable à une droite. On en distingue deux types : la période des hautes eaux (débit de base > 10L/s) et la période des basses eaux (débit de base < 10L/s). Les deux droites de régressions sont pratiquement parallèles avec une pente de 0,30 et 0,39 pour respectivement les basses et hautes eaux. Cette quasi identité des pentes quelles que soient les périodes de hautes ou basses eaux, peut s'interpréter comme une phase où toutes les surfaces contributives au ruissellement sont activées. Dans ces cas extrêmes seul 30 à 39 % de la pluie se retrouve à l'exutoire, 70 à 61 % de la lame précipitée s'infiltrant et contribuant à la part du drainage profond dans le bassin. **Les phases de ruissellement sont en conséquence contemporaines d'un fort drainage.** L'ordonnée à l'origine de la régression est assimilée au seuil de déclenchement de la réponse du bassin. Dans la période des basses eaux, ce seuil est de 33 mm de pluie et pour la période des hautes eaux de 7 mm environ. Il reflète l'écart existant entre l'état hydrique initial du bassin et la saturation.

Figure 16 : relation entre la pluie et le débit à l'exutoire du bassin de Fédé.
Influence du débit de base (hautes eaux / basses eaux)

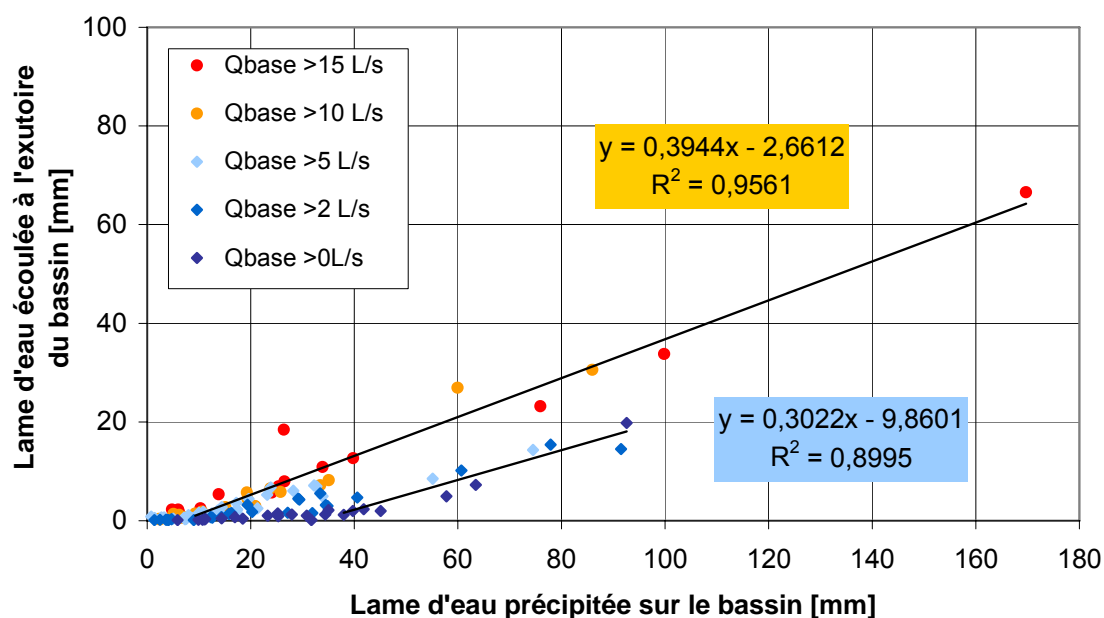


Tableau 10 : caractéristiques de la relation pluie / débit au cours des périodes des haute eaux et des basses eaux.

Hautes Eaux		$Lame\ d'eau\ écoulée = -2,6612 + 0,3944 * Lame\ d'eau\ précipitée$			
Paramètres de l'équation	Valeur	Ecart-type	Ordonnée à l'origine	[mm]	
Constante	-2,661	0,911	Volume écoulé	0	
Pluie totale	0,394	0,018	Pluie totale	6,747	

Basses Eaux		$Lame\ d'eau\ écoulée = -9,8601 + 0,3022 * Lame\ d'eau\ précipitée$			
Paramètres de l'équation	Valeur	Ecart-type	Ordonnée à l'origine	[mm]	
Constante	-9,860	1,909	Volume écoulé	0	
Pluie totale	0,302	0,030	Pluie totale	32,633	

Sur les 32 crues types, le temps de réponse du bassin a été déterminé comme l'intervalle de temps séparant le centre de gravité de la pluie et le pic de crue. On obtient une gamme de valeurs allant de 12 min à 02 h 10 min avec une moyenne de 45 min et une médiane de 36 min. On observe deux comportements de bassin différents selon l'état hydrique initial : 1) en hautes eaux la réponse du bassin est identique (temps de réponse autour de 28 min) quelque soit le cumul de pluie des 24 heures antérieures ; 2) en basse eaux le temps de réponse peut être très variable, 40 mm de pluie en 24 heures étant nécessaire pour que le sol passe à l'état saturé.

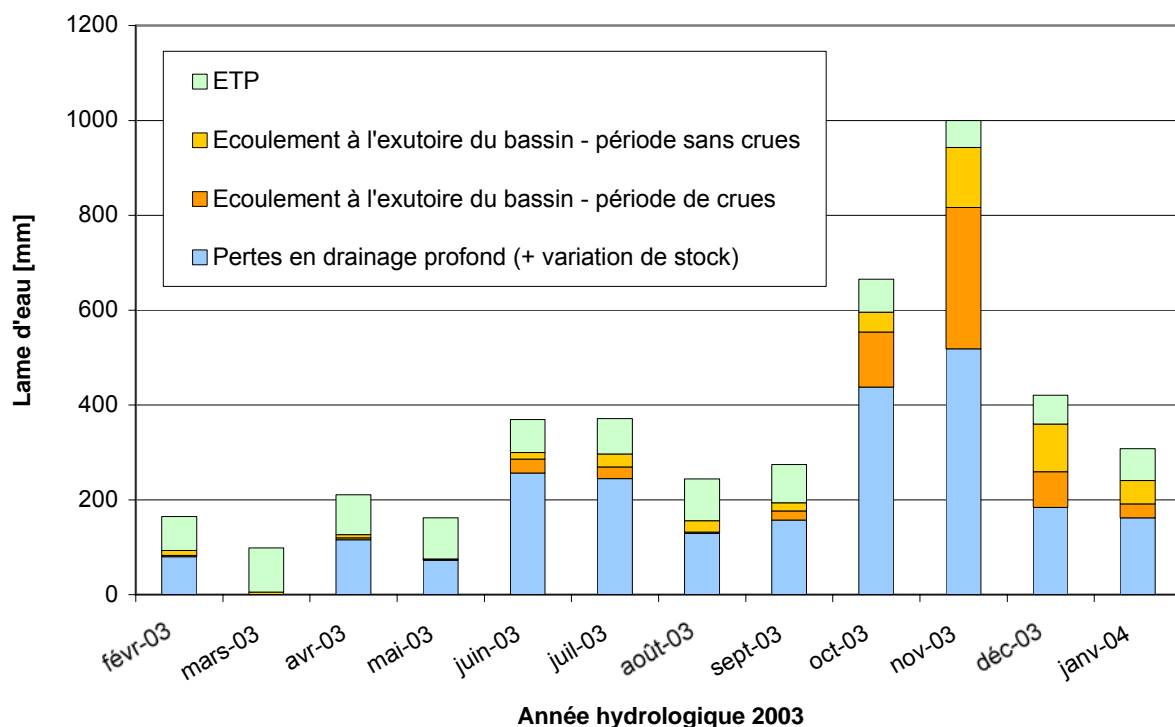
3.2.3. Bilan hydrologique approché

Le premier bilan de bassin sur Fédé a été établi sur l'année hydrologique 2003 (figure 17), de février 2003 à janvier 2004. Il est calculé suivant la formule :

Lame précipitée = Lame écoulee à l'exutoire + ETR + Variation de stock + pertes en drainage profond

- Le volume écoulé à l'exutoire qui représente sur l'année $\frac{1}{4}$ des précipitations totales se partage en $\frac{2}{3}$ du volume pendant les périodes de crues et en $\frac{1}{3}$ pendant les périodes sans crues.
- Les pertes en drainage profond représentent la part de l'eau infiltrée et non retrouvée à l'exutoire. En l'état, nous obtenons un bilan global annuel avec 54,4 % de pertes en drainage profond (pourcentage de la lame précipitée) et une variation mensuelle allant de 43,8 % en décembre 2003 à 69,4% en juin 2003. Au mois de mars, ces pertes n'ont pas été quantifiées du fait que l'ETR a été plus importante que la lame précipitée.

Figure 17 : Bilan hydrologique mensuel du bassin versant de Fédé sur l'année 2003



3.3 Dispersion des pesticides à l'échelle du bassin versant

3.4 Approche cartographique des risques

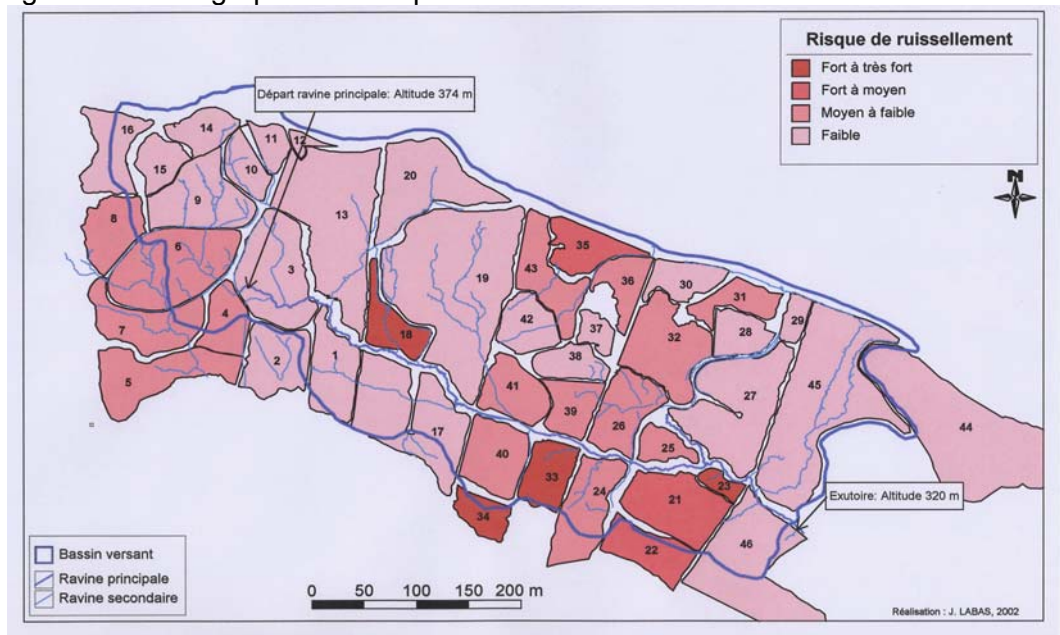
Une enquête a été réalisée sur l'ensemble des parcelles du bassin pour rendre compte du mode de circulation de l'eau en leur sein et en particulier du partage ruissellement/drainage. Les variables relevées sont issues des observations réalisées en parcelle expérimentale :

- Celles rendant compte du volume d'eau incident : structure du peuplement végétal (type, stade) et paramètres de redistribution de la pluie associés ; apports d'eau amont.
- Celles rendant compte de l'infiltrabilité des sols : zonage pédologique ; tassements
- Celles rendant compte de la circulation de l'eau en parcelle : pente ; concavité ; rugosité de surface ; couverture végétale au sol (morte ou vivante) et répartition (en andains ou aléatoirement) ; présence de chemins d'eau et organisation ; compartimentation des écoulements.

La synthèse de l'ensemble des données collectées s'est traduite par la constitution d'un indice de ruissellement dont la projection sur le modèle numérique de terrain permet de repérer les zones sensibles vis à vis du ruissellement (figure 18) utilisable pour l'orientation des pratiques culturales sur le bassin. Les variables constitutives de l'indice sont :

- la pluviométrie
- un coefficient de structure propre à la culture en place et traduisant d'une part la compartimentation des écoulements (pratiques de sillonnage par exemple) et d'autre part la redistribution de la pluie par le couvert (sur la base des travaux réalisés en 1999 et 2000).
- L'infiltrabilité des sols sur la base du travail réalisé sur la zone en 2001.
- La présence de chemins d'eau qui traduit la capacité à évacuer l'eau en dehors de la parcelle
- L'efficacité de la couverture au sol qui est le produit du % de couverture moyen et d'un coefficient d'organisation de la couverture (tous les interrangs ; 1 interrang sur 2 ; par paquets)

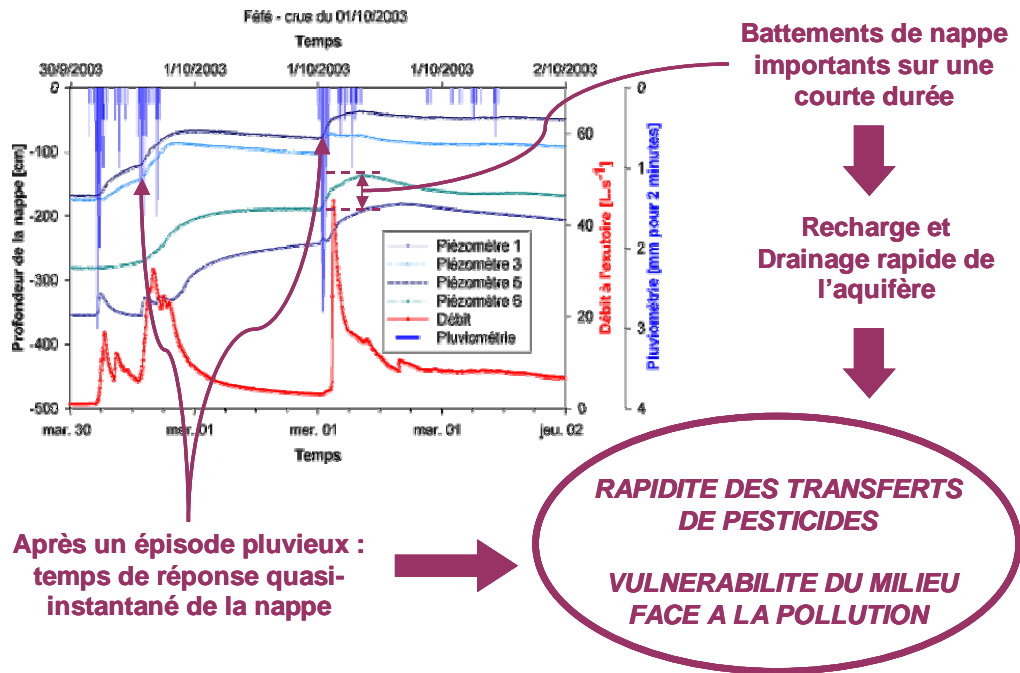
Figure 18 : cartographie des risques de ruissellement sur le bassin versant de Fédé.



3.5 Conclusion

L'analyse couplée des hyétogrammes, hydrogrammes et battements de nappe (figure 19) montre la rapidité du temps de réponse de la nappe et du débit à la ravine après un épisode pluvieux. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus à l'échelle du bananier ainsi qu'à l'échelle locale portant sur la rapidité des transferts de pesticides et de la vulnérabilité du milieu face à la pollution.

Figure 19 : réponse des nappes et de la rivière suite à un événement pluvieux



Du fait de la rapidité des écoulements, les pesticides sont susceptibles de rejoindre rapidement les nappes où leur cinétique de dégradation va être profondément modifiée. La distance surface d'épandage/nappe (ou épaisseur de la zone non saturée) constitue une variable déterminant dans le raisonnement des apports de produits phytosanitaires sur un bassin.

Les connaissances en matière de partage ruissellement/drainage permettent de proposer un indice de ruissellement aisément cartographiable et utilisable pour identifier les zones à risques à sein d'un bassin.

**PROPOSER DES ALTERNATIVES AUX PRATIQUES
EXISTANTES**

PARTIE 1. ANALYSE DE LA DIVERSITE DES PRATIQUES ET DE LEURS JUSTIFICATIONS

Les connaissances disponibles sur les exploitations agricoles, les dynamiques territoriales et les enjeux environnementaux sont limitées en zone bananière de Guadeloupe. Nous avons cherché à combler ces lacunes grâce à des diagnostics de territoire, des zonage agro-écologiques et des typologies d'exploitations. L'objectif est de parvenir à traiter les enjeux environnementaux adaptés à la diversité et aux spécificités de la zone bananière guadeloupéenne. Ces enjeux environnementaux sont traités en intégrant les dimensions sociales et économiques des territoires dans lesquels ils s'inscrivent.

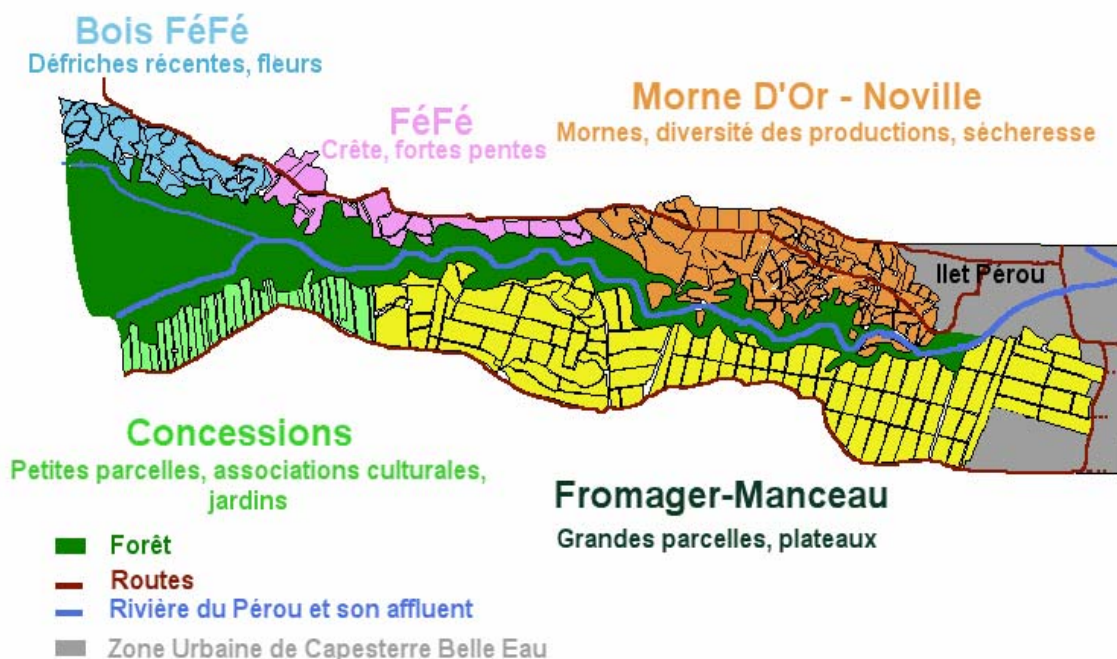
Trois zones d'étude situées sur Capesterre Belle-Eau, principale commune de production de banane², ont été sélectionnées afin de présenter des caractéristiques différenciées :

- Le bassin versant de la rivière Pérou est une zone agricole où la banane est largement dominante.
- La section de la Sarde s'étire de la côte à la forêt domaniale. Elle est marquée par une dualité entre La Sarde basse, soumise à la pression de l'urbanisation et où la diversification est présente et la Sarde haute, où la culture de banane reste dominante.
- La section de l'Habituée se situe au sud-ouest de Capesterre-Belle-Eau, sur la route qui mène aux chutes du Carbet, un des sites touristique les plus visités de Guadeloupe.

1. Le bassin versant de la rivière Pérou

Une première enquête a été réalisée en 2000 (Amoravain, 2000) sur la zone de production de la rivière Pérou. Cinq zones agroécologiques ont été identifiées sur le bassin de production (figure 20). L'analyse des systèmes de production a permis de définir 5 principaux types discriminés par la surface de l'exploitation, le type de main d'œuvre (permanente ou familiale) mobilisée pour la culture, la présence ou non de revenu extérieur (figure 21).

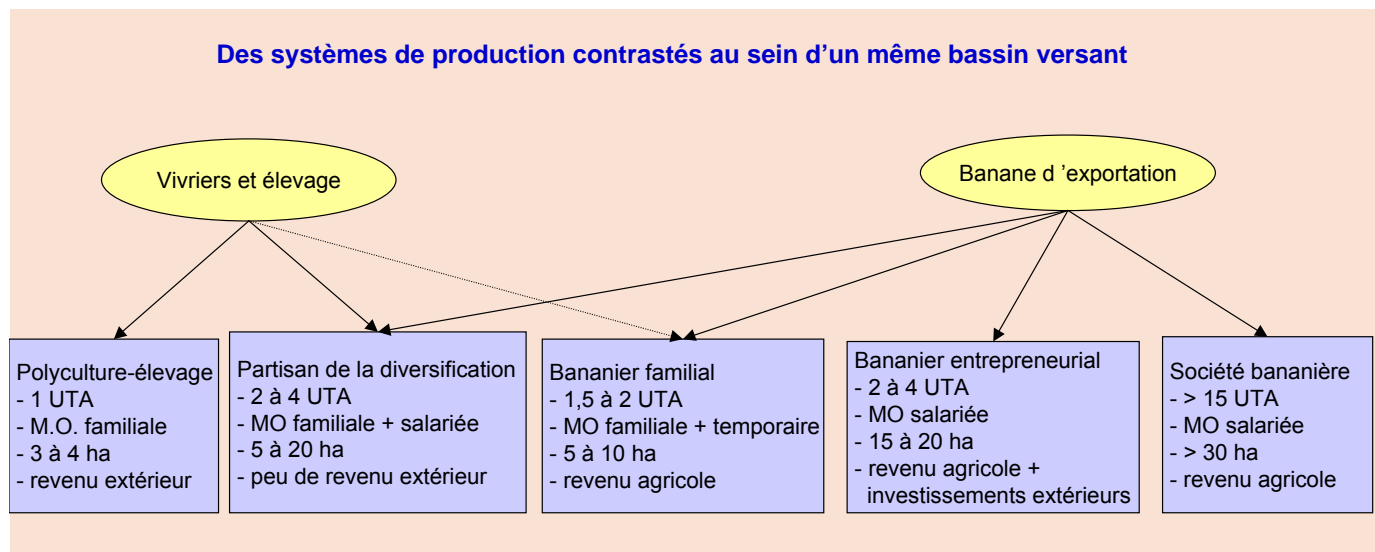
Figure 20 : Zonage agro-écologique du bassin versant de la rivière Pérou.



Cette caractérisation de la diversité permet de différencier les enjeux environnementaux selon les zones et les types d'exploitations (tableaux 11).

² Elle regroupe 54 % des superficies en banane d'après le RGA 2000

Figure 21 : Typologie d'exploitation du bassin versant de la rivière Pérou.



Tableaux 11 : exemples de proposition de développement selon les zones et les types de fonctionnement.

Exemple de propositions de développement selon les zones

ZONES	CARACTERISTIQUES	POPULATION	OCCUPATION DU SOL	AXES DE DEVELOPPEMENT POUR LE BASSIN VERSANT
CONCESSIONS	<p>Physiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altitude 250 à 360m • Zone doucement ondulée avec des pentes inférieures à 5% • Sols : andosols pérhydratés Fertilité moyenne <p>Climatiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pluviométrie >4000mm/an • Faible ensoleillement <p>Equipement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Barrage de captage d'eau 	<p>Parcelles concédées par le Conseil Général en 1921.</p> <p>Agriculteurs possédant quelques parcelles sur la zone avec l'exploitation principale ailleurs</p> <p>Agriculteurs à temps partiel</p> <p>Retraités</p>	<p>Banane d'exportation</p> <p>Jardins</p> <p>Fleurs</p> <p>Arbres fruitiers</p> <p>Friches</p> <p>Prairies (bovins)</p>	<p>Environnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pratiques de fertilisation et de lutte phytosanitaire raisonnées pour diminuer la pollution de l'eau (captage d'eau) - Consolidation de la biodiversité et renforcement de la diversification dans l'assolement <p>Gestion des conflits :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Intégration harmonieuse de la culture bananière intensive et des jardins
FROMAGER-MANCEAU	<p>Physiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altitude 25 à 250m • Zone doucement ondulé avec des pentes inférieures à 5% • Andosols ; brun-rouille à halloysites en bas de la zone Bonne fertilité <p>Climatiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pluviométrie de 2400 à 3600 mm/an <p>Equipements :</p> <ul style="list-style-type: none"> • irrigation sur le bas • haies d'érythrine 	<p>Sociétés agricoles installées sur les terres de l'usine Marquisat fermées en 1967</p>	<p>Banane d'exportation</p> <p>Jachères pâturées (bovins)</p>	<p>Environnement :</p> <p>Diminuer l'impact environnemental de la monoculture bananière intensive (diversification ; modification des pratiques culturales)</p>

Exemple de propositions de développement selon les types de fonctionnement

Type de fonctionnement	Population	Caractéristiques des systèmes de productions	Atouts et contraintes	Propositions en matière de développement
L' Eleveur - planteur	<ul style="list-style-type: none"> Agriculteur de plus de 45 ans , se considérant éleveur avant tout et ayant planté de la banane pour équilibrer son système de production ou pour obtenir des crédits bancaires à une époque où la culture bananière était fortement rémunératrice. 	<ul style="list-style-type: none"> Structures de 15 à 21 ha M.O. familiale, salariée et temporaire (UTH=3) Système de culture bananes exportées Système d'élevage cunicole Systèmes d'élevage porcins Systèmes d'élevage bovins lait Parfois revenus extérieurs Objectifs : subvenir aux besoins familiaux en consolidant les ateliers d'élevage Transformation à l'exploitation 	<p>Atouts :</p> <ul style="list-style-type: none"> Autonomie par rapport à la banane Intégration agriculture élevage Transformation et commercialisation par l'exploitant en cours ou en projet Suivis techniques des élevages <p>Contraintes et limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> Concurrence entre les productions vis à vis du travail Effluents d'élevage difficilement maîtrisés Abattoir éloigné (Baillif) Approvisionnement en ressources alimentaires et en fourrage Vols 	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration de l'intégration agriculture-élevage Encourager l'embauche Régularité de l'offre en alimentation animale Amélioration des pratiques culturales bananières Encourager la transformation artisanale à la ferme Gestion des conflits en zone périurbaine : vols
Société bananière		<ul style="list-style-type: none"> Structure >25 ha M.O. salariée (UTH>15) Outil de production moderne 	<p>Atouts :</p> <ul style="list-style-type: none"> Economie d'échelle Suivis techniques <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> Forte pression sur l'environnement et notamment sur les sol (Mécanisation) 	<ul style="list-style-type: none"> Encourager la mise en jachère et la rotation culturale Limiter le travail du sol

V. Amoravain, P. Cattan, M. Dulcire, D. Julien, juillet 2000

L'Habituée

La section de l'Habituée se situe sur la route qui mène aux chutes du Carbet, un des sites touristiques les plus visités de Guadeloupe. Ancienne zone bananière, elle connaît un processus d'enfrichement marqué. La culture de fleurs tropicales se développe, en complément ou substitution de la culture de banane. Cette zone est caractérisée par des sols agricoles de bonne qualité mais difficiles à mettre en valeur à cause de fortes pentes et d'une très importante pierrosité. De nombreuses sources et captages pour l'alimentation en eau potable sont localisées au nord-ouest de la zone (Belle-Eau Cadeau).

On retrouve à l'Habituée le type « bananier familial », constitué de planteurs de banane âgés de 45 à 65 ans. Ils sont souvent endettés et ont un équipement limité. Ils sont peu partisans de la diversification.

Originalité par rapport au bassin versant de la rivière Pérou, on rencontre à l'Habituée un groupe de jeunes agriculteurs (moins de 45 ans), diplômés, en général bien équipés (hangars modernes, serres). Ils peuvent être qualifiés de partisans de la diversification (fleur, cultures maraîchères, élevage) à volonté moderniste.

Un autre groupe est constitué d'haïtiens qui se sont installés à l'Habituée à la fin des années 70. Ils occupent des terres jadis en friches, avec un faire-valoir en colonage. La taille d'exploitation est faible (entre 0,5 et 3 ha), ce qui impose la recherche d'une autre activité en complément de revenu. Exclus de toute statistique officielle, ils cultivent des vivres (banane plantain, malanga et igname) pour le marché communal.

La faible taille des exploitations, l'endettement des planteurs de banane, les rendements peu élevés, conduisent à considérer l'augmentation du revenu des producteurs comme une priorité à l'Habituée. Plusieurs pistes de développement agricole pourraient y contribuer :

- mieux organiser la découverte de la zone et allier agriculture et tourisme. Seuls deux agriculteurs possèdent une structure agri-touristique (gîtes). Deux pratiquent la vente directe aux touristes. Beaucoup justifient l'absence de vente directe par le fait qu'ils ne voient pas les touristes ou qu'ils ne s'arrêtent pas (29 agriculteurs sur les 34 interrogés). Le flux annuel est pourtant estimé à 500 000 personnes par an.

- favoriser la diversification et améliorer la valorisation des produits, notamment par la création d'un point de vente collectif.

Dans ce contexte économique et social, plusieurs enjeux environnementaux liés aux activités agricoles se dégagent :

- la gestion des surfaces en friches, la maîtrise de la déprise agricole ;
- la limitation des apports en intrants, la gestion des déchets à proximité des captages d'eau potable ;
- la valorisation du paysage liée aux retombées touristiques.

3. La Sarde

Ancienne zone bananière, elle est aujourd'hui soumise à une forte pression foncière du fait de l'urbanisation croissante. La diversification est présente sur la Sarde basse alors que la Sarde haute reste pratiquement exclusivement plantée en banane.

A la Sarde, la production bananière est contrainte par un relief de fortes pentes, des phénomènes d'érosion et un assèchement rapide des sols. Une CUMA d'irrigation a été mise en place, ainsi qu'une coopérative de commercialisation des productions vivrières, mais elles ont connu des échecs qui restent bien ancrés dans les mémoires.

La Sarde a connu une phase de lotissements entre 1963 et 1973. La distribution a été réalisée par la SATEC, en lots de 4 ha en moyenne. Certains de ces installés peuvent aujourd'hui être classés dans le type « bananier familial », souvent retraités. Sans successeur, les surfaces en banane d'exportation régressent au profit des vivres et des friches. Ces exploitations sont amenées à disparaître. La succession de ces premiers installés apparaît néanmoins pour quelques exploitations. De jeunes exploitants, qui succèdent ou non à leurs parents, rachètent des terres et passent dans le type « Bananier entrepreneurial ».

Les sols sont ferrallitiques friables. Les impressions de sécheresse induisent la nécessité de l'irrigation. Le type de sol et les fortes pentes constituent un milieu sensible à l'érosion.

Des axes d'action pourraient concerner des regroupements de producteurs pour l'irrigation et la commercialisation des produits de diversification. Cependant, des enseignements doivent être tirés des échecs passés.

Les enjeux environnementaux liés aux activités agricoles sont la limitation de l'usage des pesticides, la collecte des déchets agricoles, la lutte contre l'érosion (raisonnement et maîtrise du travail mécanique du sol) et la déprise.

4. Eléments de synthèse sur les caractéristiques des exploitations

Chacune des zones étudiées et les exploitations agricoles qui les occupent présentent des particularités qui ont été soulignées. Au total, 126 exploitations ont été enquêtées sur les trois zones. Le traitement des données des 126 exploitations interrogées (Girbal, 2003) permet de dégager les caractéristiques des exploitations produisant de la banane export. Ces traits généraux se retrouvent sur les trois zones. Quatre groupes³ sont identifiés à partir de quatre variables : SAU, âge de l'exploitant, main d'œuvre permanente, niveau de diversification. Les valeurs de ces variables sont calculées sur l'échantillon total :

- Le bananier entrepreneurial :
 - SAU = 15 ha
 - 2 à 38 ouvriers
 - 30 à 60 ans
 - 1,9 % SAU en diversification

³ les sociétés bananières ne sont pas intégrées à cette analyse.

Il possède d'importants facteurs de production et a investi beaucoup de capitaux dans la culture de la banane. Il gère son exploitation comme une entreprise et recherche sa rentabilité. Bien que possédant une importante surface, la diversification ne l'attire guère.

- Le jeune bananier familial : SAU = 5 ha
0 à 2 ouvriers
20 à 40 ans
6,5 % SAU en diversification

Il reprend généralement la succession de ses parents qui continuent de l'aider pour la conduite de l'exploitation, ceci diminuant son besoin de main d'œuvre extérieure. Il se concentre principalement sur la banane d'exportation.

- Le bananier familial : SAU = 4 ha
0 à 6 ouvriers
40 à 81 ans
3,5 % SAU en diversification

C'est généralement une personne qui a investi dans la banane dans les années 80, à l'époque où la banane permettait de gagner de l'argent même sur de faibles surfaces. N'étant pas forcément issu du milieu agricole, il ne connaît généralement que la culture de la banane à laquelle il se raccroche tant bien que mal.

- Le partisan de la diversification : SAU = 6,3 ha
0 à 3 ouvriers
30 à 70 ans
35 % SAU en diversification

Il est résolument engagé dans la diversification tout en conservant toutefois une production de banane export car la filière représente une certaine sécurité et une certaine reconnaissance sociale. En moyenne le tiers de sa surface est consacré à d'autres cultures.

Sur l'ensemble de l'échantillon, 99 exploitations sont classées dans ces types. Nous comptabilisons : 16% de bananiers entrepreneuriaux, 48% de bananiers familiaux, 15% de jeunes bananiers familiaux et 21% de partisans de la diversification.

5. Conclusion

Les enjeux environnementaux sont proches dans toutes les zones étudiées. La hiérarchie des priorités varie selon la proximité des captages d'eau, la sensibilité des sols à l'érosion, l'importance de la déprise agricole.

La diversité des exploitations agricoles a été caractérisée. Les enjeux environnementaux varient selon les types d'exploitation.

Les caractéristiques des zones et des exploitations sont des déterminants des pratiques culturelles et notamment de l'adoption de pratiques plus respectueuses de l'environnement auxquelles nous nous intéressons maintenant.

PARTIE 2. CONDITIONS D'ADOPTION DES INNOVATIONS DESTINEES A MINIMISER L'IMPACT NEGATIF DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LA QUALITE DES EAUX : QUELLES PRATIQUES PLUS RESPECTUEUSES DE L'ENVIRONNEMENT ? COMPATIBILITE AVEC LES SYSTEMES DE PRODUCTION EXISTANTS ET LES STRATEGIES DES EXPLOITANTS

Après avoir présenté plusieurs types d'itinéraires techniques, nous portons notre attention sur les conditions de mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement dans les exploitations bananières.

1. Trois itinéraires techniques types

Les choix techniques effectués par les cinq types d'exploitation identifiés sur le bassin versant de la rivière Pérou ont été caractérisés (Amoravain, 2000) et se répartissent en 3 itinéraires techniques types (tableau 12) : le premier, le plus élémentaire, pratiqué dans les exploitations du type polyculture élevage et associé à la culture de banane pérenne (ITK1) ; le second qualifié d'économique (ITK2), le plus courant, dans lequel les agriculteurs limitent les travaux à l'essentiel afin d'optimiser leur production par rapport au temps de travail, aux intrants et aux revenus engendrés par la production ; le troisième qualifié de techniciste (ITK3) utilisant régulièrement les engrais et produits phytosanitaires et pratiqué dans les exploitations disposant d'une main d'œuvre suffisante (type bananier entrepreneurial).

Tableau 12 : Trois types d'itinéraires techniques sur le bassin versant de la rivière Pérou

Systèmes de cultures banane	ITK 1	ITK 2	ITK 3
Zone agro-écologique	Bois Féfé, Concessions	Morne d'Or, Féfé, Bois Féfé, Concessions	Morne d'Or, Féfé, Concessions, Manceau-Fromager
Durée du cycle	12 mois (Concessions et Bois Féfé)	8 à 11 mois en fonction de la zone agro-écologique	8 à 11 mois en fonction de la zone agro-écologique
Variétés	Poyo	Poyo ou Grande Naine	Grande Naine
Matériel végétal	Traditionnels	Traditionnels ou vitroplants	Vitroplants/jachère
Préparation du sol	Manuelle	Manuelle/mécanisée	Mécanisée
Densité	1800 (Bois Féfé)	1800 à 2400 en fonction de la zone agro-écologique	Oscille autour de 2000 En fonction de la zone agro-écologique
Date et fréquence de replantation	Replantation > 10 ans	5 à 10 ans Avril-Août	<=5 ans Préférentiellement Avril-Août/ en continue selon la surface en production
Amendements calciques Chaux magnésienne ou dolomie	rare	1 à 2 tonnes /hectare et par an	45 tonnes hectare à la plantation
Fumure d'entretien			
DAP	1 apport	1 apport	1 à 2 apports
SUPOMAG	-	-	1 apport
Chlorure de potassium	-	à la jetée	à la jetée
Fréquence des engrais		Fonction de la trésorerie	Régulière
Urée	15 jours après la plantation	15 jours après la plantation	15 jours après la plantation/ 1 fois par mois pendant les trois premiers mois
Complexes	Limités: tous les 2 à 4 mois (doses très variables)	Irréguliers: 1 fois par mois ou tous les deux mois (doses irrégulières)	tous les 21 jours (150 g/pied)
Contrôle de l'enherbement	Parcelles peu entretenues	Régulier	Régulier
Manuel	Non	Autour des jeunes plants	Autour des jeunes plants et en cours de cultures
chimiques		Variable selon la zone agro-écologique	Variable suivant la zone agro-écologique
Protection phytosanitaire			Régulière
Nématicide Temik	1 à 2 passages par an	Variable 1 à 4 passages/an	4 passages/an
Autres	-	idem	4 passages/an
Soins en cours de culture	limités	Engainage, épistillage	Engainage, haubanage, effeuillage
Rendement	8 à 13 tonnes/ha	10 à 15 tonnes/ha	20 à 30 tonnes/ha
Impact sur l'environnement	Intrants non raisonnés - Propice au développement parasitaire - Conservation de la structure du sol+	Intrants non raisonnés - Matériel végétal non sain - Tassement du sol -	Fort recours aux pesticides et aux engrais - Tassement et érosion en pente - Jachère + Matériel végétal sain +

2. Une voie pour limiter les apports en intrants ? Place des pratiques de jachère et de rotation dans les exploitations

Plusieurs voies seraient susceptibles de limiter les traitements en pesticides appliqués en bananeraie : réduction des doses, des fréquences, choix de variétés, associations ou rotations culturales. C'est à ces dernières que nous nous intéressons.

Différents travaux ont montré l'intérêt d'introduire la jachère ou d'autres cultures en rotation notamment pour maîtriser le parasitisme de façon à réduire l'utilisation des pesticides. Alors que les rotations culturales sont reconnues par la recherche agronomique comme une nécessité pour la culture bananière, on ne savait pas par qui ni à quelles conditions elles pourraient être mises en œuvre. Comment ces pratiques s'intègrent-elles au fonctionnement de l'exploitation agricole ?

Afin de mieux appréhender les pratiques actuelles des agriculteurs, ainsi que les modes de gestion de l'assolement et ses déterminants, une quinzaine d'enquête a été réalisée dans chacun des secteurs précédemment analysés : 15 dans le bassin versant de la rivière Pérou, 15 à la Sarde et 12 à l'Habituée, soit au total 42 enquêtes.

Les enquêtes ont permis de quantifier la fréquence d'apparition de différents systèmes de culture dans les exploitations. La monoculture reste dominante : elle occupe 54 % des surfaces des exploitations enquêtées. Ce constat nous conduit à rechercher les freins à l'adoption de pratiques de jachères et rotations. La compréhension des déterminants de la gestion de l'assolement nous permet d'identifier ces principaux freins.

Le manque de connaissance technique sur les effets agronomiques des jachère et rotation n'est pas un frein majeur : seules 22 % des personnes interrogées n'en connaissent pas l'intérêt ou pensent qu'elles sont inutiles. 45 % sont convaincus de l'intérêt mais ne les pratiquent pas. 33 % sont convaincus et pratiquent.

L'effet du manque de SAU et de SAU mécanisable a été confirmé. Nous n'observons pas de pratique de jachère ou de rotation dans des exploitations de moins de 5 ha (alors que l'échantillon d'enquête en comprenait). Ce seuil passe à 10 ha pour des exploitations ayant moins de 50 % de SAU mécanisable.

Il convient de distinguer les freins à la rotation des freins à la diversification. La diversification répond à des objectifs économiques de recherche d'un complément de revenu. Les freins à la diversification sont relatifs aux débouchés, à l'organisation des modes de commercialisation, à un manque de connaissance technique sur la conduite des cultures autres que la banane.

La rotation répond à des objectifs agronomiques. Les freins à la rotation portent sur une localisation spécifique des cultures dont les contraintes spécifiques empêchent un changement de localisation, un manque de connaissance sur l'effet agronomique des rotations. Certains exploitants n'ont pas d'objectif d'assainissement ; la rotation ne correspond pas à leurs objectifs.

Les freins à l'adoption de pratiques de jachère et de rotation sont à distinguer selon la stratégie productive de l'exploitant :

- Certains sont en phase de transition de la banane vers la diversification ; il n'ont pas de raisonnement à long terme sur la banane ce qui est nécessaire pour une pratique de jachère ou rotation.
- D'autres associent dans leur système de production de la banane et de la diversification. L'ensemble constitue un système en équilibre, notamment car la diversification constitue un apport en trésorerie à certains moments clés pour la banane. Ces combinaisons de production ne se traduisent pas toujours par une mise en rotation ; nous observons aussi des juxtapositions de monocultures. Les freins aux rotations sont liés à des localisations spécifiques de cultures. Nous notons également un manque de connaissance de l'intérêt agronomique des rotations, un manque de prise en compte de l'ensemble du parcellaire. Pour certains,

l'assainissement n'est pas un objectif. La recherche de complément de revenu par la diversification est l'objectif prioritaire.

- Certains planteurs enfin restent centrés sur la production de banane. C'est ici le système banane/jachère qui pourrait correspondre à leur système de production. Les freins à l'adoption de pratiques de jachères sont de plusieurs ordres : manque à gagner sur une terre qui ne produira pas pendant un certain temps ; frein psychologique de voir une terre non travaillée ; manque de références techniques sur les modalités de conduite de la jachère.

La monoculture reste dominante. Il est cependant important de noter que l'on observe des pratiques de jachère et de rotation.

Quatre systèmes de culture en rotation ont été observés. Ils varient selon les cultures en rotation, les durées de chaque culture, la surface occupée par le système. Les exploitants ayant expérimenté les rotations reconnaissent un bon assainissement du sol permettant une nette diminution de leurs intrants et une augmentation du rendement en banane. La gestion de la rotation reste propre à chaque exploitant et répond plus à des objectifs personnels et de marché qu'à de réels questionnements sur les précédents culturels.

La pratique de la jachère est plus courante. Elle est présente chez 26 % des 42 exploitations enquêtées (Berger, 2002). La majorité des exploitants l'ont mise en place volontairement, conscients de son efficacité en matière d'assainissement du sol pour la plantation de vitroplants (technique préconisée par les services d'appui technique), d'augmentation des rendements en banane et d'économie de produits phytosanitaires. Dans certains cas, la mise en jachère est involontaire, résultat d'une contrainte externe : manque de trésorerie, passage d'un cyclone. C'est parfois l'occasion d'une prise de conscience de ses effets bénéfiques. Non convaincus de l'intérêt d'investir du temps et de l'argent dans une terre non productive, certains exploitants n'entretiennent pas la jachère. La plantation de vitroplants trop précoce et sur un sol non assaini peut se révéler catastrophique et décourager l'exploitant.

Les modes de gestion de la bananeraie diffèrent selon les systèmes de cultures. Le tableau 13 présente des caractéristiques chiffrées :

Tableau 13 : Caractéristiques de la bananeraie suivant différents modes de gestion d'après les données d'enquêtes (Berger, 2002)

	Banane continue	Banane pérenne	Banane+jachère	Banane+rotation
Fréquence d'apparition nombre d'exploitants concernés	48% chez 24 exploitants	18% chez 9 exploitants	26% chez 13 exploitants	8% chez 4 exploitants
Durée de vie	2 à 10 ans	pérenne	4 à 5	4 à 6
Rendements moyens estimés par les planteurs	26 t / an	24 t / an	32 t / an	47 t / an
Mode de destruction de la bananeraie	Manuelle ou mécanique	Accidentelle	Manuelle Mécanique ou Chimique	Mécanique ou Chimique
Pratique du recourage	50% oui 50% non	oui	Parfois	non
Matériel végétal utilisé	Rejets, parfois vitroplants	Rejets	Vitroplants	Vitroplants
Fréquence apports engrais	54% 1/mois 29% 1/ 2 mois 17% 1/trimestre	44% 1/mois 56% 1/ 2 mois	54% 1/mois 46% 1/ 2 mois	100% 1/mois
Moyenne apports engrais	8,9 / an	8,6 / an	9,24 / an	12 / an
Fréquence apports produits phytosanitaires	20% 1/an 50% 2/an 30% 3/an	33% 1/an 33% 2/an 33% 3/an	31% 1/an 46% 2/an 23% 3/ an	50% aucun pendant 4 ans 50% 2/an
Moyenne apports produits phytosanitaires	2,1 / an	2 / an	1,92 / an	1,2 / an

Ces caractéristiques nous permettront de conduire une évaluation économique dans la partie suivante.

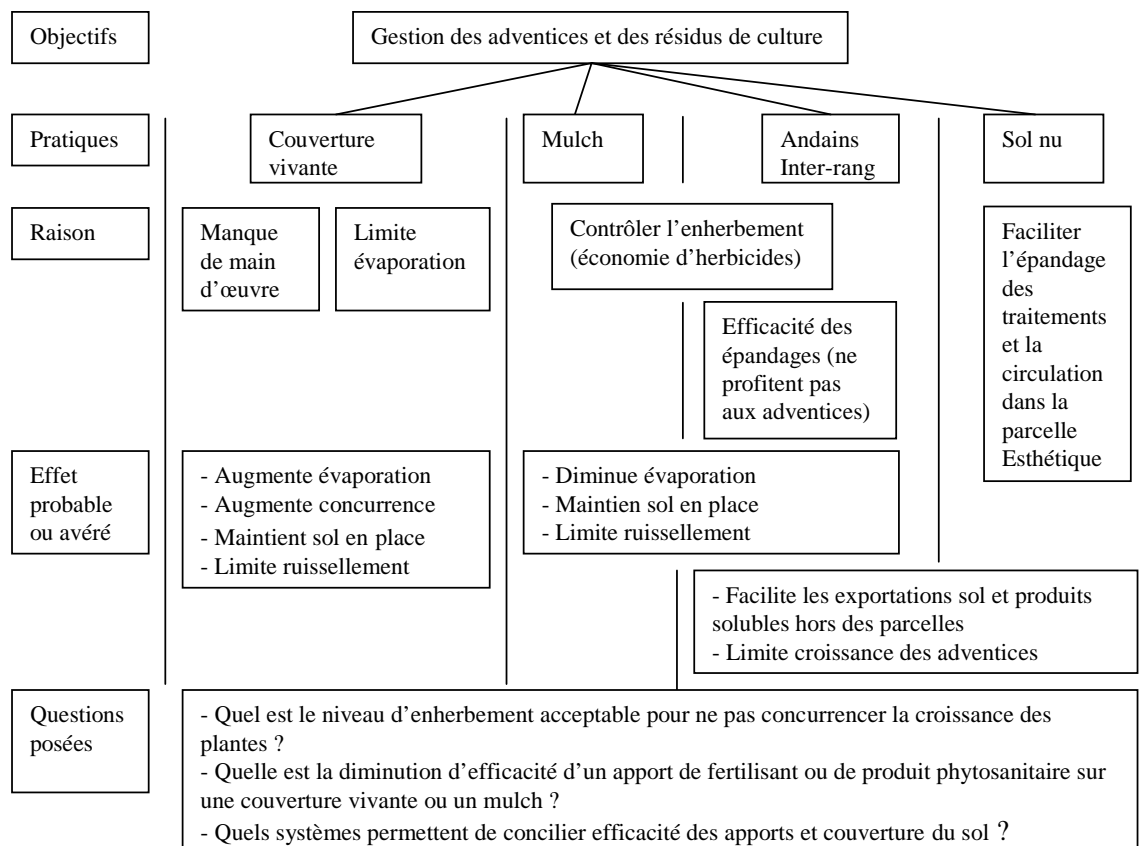
3. Les pratiques favorisant les transferts de sol, pesticides et engrais par ruissellement

Une enquête a été menée en 2001 sur 7 exploitations portant sur l'identification des pratiques favorisant les transferts de sol, pesticides et engrais par ruissellement. Elle a porté sur l'analyse de la relation entre les états de surface – principaux déterminants des départs par ruissellement en parcelle – et le mode de gestion des terres par les agriculteurs.

L'enquête (Andrieux, 2001), s'appuyant sur le recensement préliminaire des états de surface en bananeraie, a été basée sur des variables clés indicatrices du risque de ruissellement en parcelle. Il s'agit : de la position topographique (zone de départ, de transfert, d'accumulation) ; de la micro-topographie (sillon, trou, buttes) ; de la couverture du sol (mulch, sol nu, andains, couverture vivante). Chaque combinaison de ces 3 variables traduit un risque de ruissellement et permet de juger de l'itinéraire technique appliqué vis à vis de ce phénomène.

L'enquête menée auprès des exploitants a montré que la gestion des transferts d'eau et des éléments associés n'est jamais intégrée dans le référentiel des agriculteurs. Les états de surface sont gérés indépendamment des situations topographiques et résultent d'objectifs ou de contraintes divers, liés au contrôle de l'enherbement ainsi que des résidus de culture. La figure 22 ci-après en présente les modalités. Les points à souligner sont : un référentiel technique incomplet de la part de l'exploitant ou du personnel d'encadrement (adventices laissées en place en période sèche pour limiter l'évaporation alors que l'effet avéré est inverse – désherbage quand la croissance des adventices est la plus forte, en période pluvieuse, laissant alors le sol à nu aux instants critiques) ; un référentiel technique incomplet en matière de recherche que traduisent les questions posées (cf figure 22) et qui sont en voie de traitement dans et en dehors du cadre du présent projet (notamment en terme de gestion des couvertures mortes par utilisation d'herbicides ainsi qu'en terme de compétition entre plantes).

Figure 22 : Prise de décision en matière de gestion des adventices et des résidus de culture chez les agriculteurs enquêtés



4. Conclusion

L'ensemble des enquêtes met l'accent sur les difficultés de trésorerie comme premier frein à une « bonne » gestion des parcelles : les produits sont employés non pas suivant le type, la dose, la période adaptée au traitement mais suivant les capacités d'achats (matière active la moins onéreuse à faible dose et quand les fonds sont disponibles – ou encore espacement des fréquences de traitement se traduisant par une augmentation des doses quand on peut acheter le produit). L'empirisme dominant dans les choix techniques est préoccupant et traduit la difficulté d'accès à l'information technique.

Cependant un certain nombre d'agriculteur mettent en place des modalités de gestion de leur parcelle compatibles avec une limitation des exportations des produits polluants. Peu de références permettent cependant d'en juger les résultats agronomique et économique.

PARTIE 3. EVALUATION ECONOMIQUE DES PRATIQUES RESPECTUEUSES DE L'ENVIRONNEMENT ET MESURES INCITATIVES.

Le manque de références économiques concernant la mise en place d'une pratique constitue un obstacle à son développement : si la mise en place et l'entretien d'une jachère ou d'une rotation demande plus d'investissements qu'ils ne dégagent de bénéfices, pourquoi s'engager ?

Face à l'absence de références à ce sujet, une analyse des coûts et gains engendrés par ces pratiques plus favorables à l'environnement a été conduite.

1. Modes de calcul

Nous utilisons les résultats provisoires acquis par le programme MICA en zone bananière. Ce modèle de simulation de l'impact des politiques économiques sur l'offre agricole est conçu par l'INRA, avec l'intervention du CIRAD. Le modèle simule le choix de combinaisons de productions au sein des exploitations agricoles. Sa mise en œuvre en zone bananière a permis de réunir un ensemble de données sur la constitution des marges brutes (décomposition des produits et des charges) de modes de conduite de la culture bananière (plus ou moins intensifs). Les paramètres de ce modèle ont été ajustés en prenant en compte les résultats des enquêtes précédentes sur les pratiques de jachère et rotation d'une part (Berger, 2002, cf. tableau 13) et des enquêtes complémentaires d'autre part (Girbal, 2003).

Les paramètres des tableaux MICA sont ajustés à l'aide des données d'enquêtes : coût de destruction de la bananeraie, de fertilisation, de traitements phytosanitaires, rendement et durée de la bananeraie sont modifiés afin de correspondre aux données d'enquêtes obtenus pour plusieurs systèmes de culture (bananeraie pérenne, continue, banane-jachère et banane-rotation).

Dans les quatre cas, les postes de commercialisation regroupant le conditionnement et l'expédition représentent de 60 % à 70 % du total des charges. Viennent ensuite les postes des intrants (fertilisation et traitements phytosanitaires) qui représentent 14 % des charges. Les variations de rendement auront d'importantes répercussions sur le montant de la marge brute. L'importance des intrants est à noter, mais dans une moindre mesure.

Dans le cas de la monoculture bananière pérenne, les soins apportés à la culture sont minimums, la plantation est faite à partir des rejets naturels du bananier, la destruction de la bananeraie est manuelle. Le rendement considéré est de 24 t/ha et la durée de vie de la bananeraie est estimée à 12 ans. La marge brute est ainsi évaluée à 1580 €/ha/an.

Le rendement obtenu avec la monoculture bananière continue est à peine plus élevé que précédemment (il atteint 26t/ha/an). La durée de vie moyenne est de 5 ans. Fertilisation et traitements phytosanitaires sont un peu plus intensifs que dans le cas de la bananeraie pérenne. Ce système de culture repose sur un recours régulier et fréquent aux intrants pour limiter les risques parasitaires. Cependant, souvent, la trésorerie des exploitants limite les soins apportés aux bananiers. La marge brute estimée est de 2030 €/ha/an.

La mise en place d'une rotation des cultures affecte en premier lieu le rendement obtenu : d'après les observations d'A. Berger (2002), celui-ci est de 47 t/ha. La durée de vie de la plantation est en moyenne de 5 ans. Les traitements phytosanitaires sont moins fréquents : 1,2 en moyenne par an, sur une durée de 5 ans, contre 2 en moyenne dans une gestion en monoculture. Les apports en engrais, quant à eux, sont plus fréquents : 12 par an en moyenne contre 8,6 en gestion pérenne, ou 8,9 en gestion continue. Nous modifions également le coût de la destruction de la bananeraie et de la plantation et considérons ceux évalués à partir du modèle MICA basé sur un itinéraire cultural plus intensif. Il s'agit de l'évaluation économique d'une destruction mécanique et de celle d'une plantation avec des vitroplants. Il est à noter que ce mode de plantation est moins contraignant au niveau de la mise dans le sol et est subventionné. La marge brute obtenue ici est 5 fois supérieure à celui de la bananeraie

pérenne et 3 fois supérieure à la banane continue. Cette augmentation est principalement le fait de la forte augmentation de rendement (+21 à 23 t). Ce chiffre doit donc être regardé avec précaution car l'augmentation de rendement est établie à partir d'enquêtes sur un petit nombre d'exploitants. On remarque également la baisse significative du montant alloué aux traitements phytosanitaires : environ 400 € d'économie.

Pour le calcul de la marge brute dégagée par la culture de banane suite à une jachère, le rendement est en augmentation par rapport à une gestion classique. Il atteint 32 t/ha. La durée de vie moyenne de la plantation est de 5 ans. Le recours aux engrais est un peu plus fréquent par rapport à la banane pérenne ou continue : 9,2 en moyenne par an tandis que l'importance des traitements phytosanitaires diminue : 1,9 en moyenne par an. Comme précédemment on prend en compte une destruction mécanique de la bananeraie et un mode de plantation avec vitroplants. La marge brute dégagée par l'activité bananière suite à une jachère est multipliée par 2,3 par rapport à celle dégagée par la banane pérenne et par 1,5 par rapport à la banane continue. Ceci est à nouveau principalement dû à l'augmentation du rendement. Néanmoins cette estimation n'est pas complète. Il s'agit ici de la marge brute dégagée par la culture bananière. En effet si le coût de la destruction de la bananeraie (nécessaire à la mise en place d'une jachère) est pris en compte, le coût relatif à l'entretien de la jachère (destruction des repousses de bananiers et autres travaux nécessaires selon le mode de conduite choisi), ne sont pas comptés dans les charges. De même les éventuels gains provoqués par une activité connexe à la jachère : pâturage de bêtes, cultures intermédiaires, ne sont pas pris en compte dans les produits.

Ces éléments restent très liés au choix de l'exploitant quant à la conduite de sa jachère. Ces premiers calculs montrent la supériorité des résultats économiques des systèmes de cultures banane/jachère ou banane en rotation par rapport aux systèmes monocultureux classiques. Ces deux pratiques apparaissent économiquement avantageuses car elles permettent une importante augmentation de rendement et une sensible économie de produits grâce à un assainissement des sols. Il reste à savoir si cette augmentation de marge brute compense la diminution de surface en production et les coûts d'entretien nécessaires à leurs mises en place.

Pour répondre à ces questions, les calculs que nous allons effectuer reposent sur une mise en situation dans les exploitations enquêtées.

2. Le gain économique de la mise en rotation banane/ananas

Retenons pour commencer un exemple simple : un exploitant interrogé pratique la rotation banane/ananas sur une surface de 2 ha et une durée de 4 ans pour banane et 4 ans pour ananas.

La comparaison juxtaposition de monoculture/système en rotation (tableau 15) montre un gain économique de 3 464 €/ha/an au bénéfice de la rotation. Précisons que seul l'effet sur la banane est pris en compte (augmentation de rendement et gain d'application en produits phytosanitaires évalués grâce aux données d'enquêtes). L'effet de la rotation sur la culture d'ananas n'est pas pris en compte. Le gain est donc certainement minimisé.

Tableau 11 : Evaluation économique de la rotation banane/ananas

B/A	Systèmes monoculturaux			Système en rotation		
Cultures	S ha	Temps	MB euros	S ha	Temps	MB euros
BE	1	4	8 124 €	1	4	35 836 €
Ananas	1	4	46 212 €	1	4	46 212 €
Total	1	8	54 336 €	1	8	82 048 €
Gain global	27 712 €					
Gain /an /ha	3 464 €					

3. Exemple chez un pratiquant convaincu : quand le système est en place, des gains économiques conséquents et un intérêt environnemental notable

Prenons maintenant le cas de la jachère. L'exploitant, du type « bananier entrepreneurial », dispose d'une SAU de 21,5 ha au total dont 50 % mécanisable. Il pratique la jachère avec replantation en vitroplants.

Tableau 12 : Comparaison économique entre un système monocultural non subventionné et une jachère subventionnée chez un « bananier entrepreneurial »

	Système monocultural			Système avec jachère		
	S ha	Temps	MB euros	S ha	Temps	MB euros
BE	1	7	14 217 €	1	5	44 245 €
Jachère	0	0	0 €	1	2	423 €
			<i>coût entretien</i>	1	2	1 468 €
			<i>subvention</i>	1	2	1 890 €
Total	1	7	14 217 €	1	7	44 668 €
Gain global	30 451 €					
Gain /ha /an	4 350 €					

L'évaluation économique (tableau 12) montre que non seulement l'aide incitative couvre les frais d'entretien, mais le gain de productivité comble largement le déficit dû à la période d'improductivité.

La comparaison avec la marge brute d'un système monocultural en banane continue (calculée sur la base des données recueillies par enquêtes dans les exploitations, cf. tableau 12) laisse apparaître qu'un gain annuel de 4 350 euros/ha est généré grâce à la pratique de la jachère. Il faut néanmoins relativiser ce gain. La marge brute dégagée par le système monocultural a, en effet, été établie à partir de la moyenne de données concernant principalement des bananeraies de petite taille. Or l'exploitant dispose d'importants moyens de production, notamment foncier et ouvrier, ce qui laisse prévoir un mode de gestion de la bananeraie et des résultats différents de ceux de petites structures.

Loin de coûter de l'argent, la jachère en rapporte. L'intérêt environnemental s'ajoute à l'intérêt économique puisque l'exploitant économise six traitements phytosanitaires les trois premières années après jachère.

4. Exemple d'un petit producteur non pratiquant : le manque à gagner lors de la jachère est un frein majeur. Pourtant, le système à l'équilibre dégage un gain économique

L'exploitant du type « jeune bananier familial » dispose d'une SAU de 5,41 ha non mécanisée. Pour l'évaluation économique, nous supposons que la mise en place d'une jachère est conduite selon le mode suivant : 4,41 ha consacrés à la banane, 1 ha consacré à la jachère d'une durée de 18 mois pour un bon assainissement des sols avant plantation de vitroplants. On conserve ainsi une surface en banane supérieure à 4 ha, minimum au-dessous duquel l'exploitant déclare ne pas pouvoir générer de revenu.

Sans aucune subvention, la pratique de jachère génère un gain économique (tableau 13) :

Tableau 13 : Comparaison économique entre monoculture et système avec jachère non subventionnés chez un « jeune bananier familial »

	Système monocultural non subventionné			Système en jachère non subventionné		
	S ha	Temps	MB euros	S ha	Temps	MB euros
BE	1	7	13566	1	5	18810
Jachère	0	0	0	1	2	1468
coût entretien				10	2	1468
gain						
Total	1	7	13566	2	7	17343
Gain global	3777					
Gain /ha /an	540					

Au moment où l'exploitant a pris sa décision de choix de système de culture, de contractualisation et donc de bénéfice d'aide, la mesure bananeraie pérenne d'altitude était opérationnelle, mais pas l'aide à la jachère. Dans cette situation l'évaluation économique donne un avantage à la monoculture subventionnée (tableau 14) :

Tableau 14 : Comparaison économique entre monoculture subventionnée et système avec jachère non subventionné chez un « jeune bananier familial »

	Système monocultural subventionné			Système en jachère non subventionné		
	S ha	Temps	MB euros	S ha	Temps	MB euros
BE	1	7	13556	1	5	18810
Jachère	0	0	0	1	2	1468
coût entretien				1	2	1468
Subventions	1	7	6299			
Total	1	7	19865	1	2	17343
Gain global	-2523					
Gain /an /ha	-360					

Lorsque les deux systèmes de culture sont aidés, l'avantage est au système monoculturel, mais l'écart n'est pas très marqué (tableau 15) :

Tableau 15 : Comparaison économique entre monoculture subventionnée et système avec jachère subventionné chez un « jeune bananier familial »

	Système monoculturel subventionné			Système en jachère subventionné		
	S ha	temps	MB euros	S ha	temps	MB euros
BE	1	7	13566	1	5	18810
Jachère	0	0	0	1	2	423
coût entretien				1	2	1468
Subventions	1	7	6299	1	2	1890
Total	1	7	19865	1	7	19233
Gain global	-633					
Gain /ha /an	-90					

Cet exemple montre le poids potentiel des systèmes d'aide dans la prise de décision des exploitants et donc la nécessité d'une réflexion approfondie pour une réelle réponse aux enjeux environnementaux (sur cet exemple, vaut-il mieux une bananeraie pérenne ou un système banane-jachère dans cette zone ?).

5. Conclusion

Le manque à gagner pendant l'année de jachère est compensé par l'aide financière attribuée aux jachères, les gains de rendement obtenus grâce à la restauration de la fertilité des sols obtenue après jachère et les économies en apports de produits phytosanitaires.

Cependant, le changement de pratique est une étape à franchir qui a un coût (manque à gagner pour une jachère), insurmontable pour les exploitants qui n'ont pas suffisamment de revenu et de disponibilité en trésorerie. Pourtant, lorsque le système est en place (système banane/jachère ou rotations culturales), il génère des gains économiques conséquents et un intérêt environnemental notable. Le retour sur investissement se révèle intéressant ! Des dispositifs de crédits ou d'avance en trésorerie pourraient aider à affronter les difficultés financières pendant la jachère et profiter des avantages qui suivent.

Les systèmes de culture bananiers avec rotation ou jachère sont à la fois plus respectueux de l'environnement car ils permettent la diminution du nombre de traitements phytosanitaires et économiquement intéressants car ils permettent d'augmenter le rendement et d'économiser des produits. La préoccupation environnementale soutenue par une amélioration de la rentabilité est un argument qui devrait convaincre les exploitants à s'engager. Au vu de ces résultats, il apparaît nécessaire de renforcer les incitations et les conseils, sans se limiter aux arguments agronomiques existants, mais en les complétant par une démonstration des intérêts économiques et environnementaux.

CONCLUSION GENERALE

Les différentes actions entreprises dans le cadre du projet ont permis d'appréhender la diversité des situations en milieu réel. Différentes approches à différentes échelles ont permis d'organiser cette diversité et d'en identifier quelques déterminants. Il fallait tout d'abord mieux connaître le milieu physique de la zone d'étude dont le résultat a été le zonage agroécologique du bassin. La typologie de fonctionnement des exploitations agricoles de la zone a permis de cerner les interlocuteurs du programme de recherche et leur mode de conduite de la culture. L'incidence de leur pratiques sur les propriétés hydrodynamiques des sols a confirmé les diagnostics préalables sur les itinéraires techniques en bananeraie, notamment en ce qui concerne les atteintes au fonctionnement hydrique des sols par la mécanisation. L'étude a de plus permis d'illustrer la variabilité de ces atteintes, pour une petite agriculture en zone de morne, en fonction des conditions d'application des techniques (climat, sol et topographie) et d'en relativiser l'importance. Une première approche des déterminants des pratiques a souligné la méconnaissance par les agriculteurs des effets des pratiques sur le milieu, et la non prise en compte du risque environnemental. Les raisons sont à rechercher dans un déficit d'accès à l'information technique et par le manque de références en matière de raisonnement des itinéraires techniques. L'acquisition de telles références a été entreprise en partie à partir de l'étude des flux d'eau en ruissellement et en drainage dans une bananeraie, pour deux systèmes de culture déjà appliqués par des exploitants sur la zone. La caractérisation de l'hétérogénéité de la répartition de l'eau en parcelle (passage de roue pour le ruissellement ; aplomb du bananier pour le drainage), la quantification des flux d'eau en drainage rapide et en ruissellement et les mesures d'éléments solubles associés devront permettre : de mieux déterminer les conditions dans lesquels les exportations d'éléments solubles en surface et vers les nappes sont maximisées (définition d'indicateurs) ; de proposer des modes de gestion des épandages différenciés (hors des zones potentielles de départ) notamment en fonction de la connaissance acquise des modalités de gestion des parcelles par les agriculteurs.

ANNEXES

Rapports d'interprétation

CATTAN P. (2004). Variabilité spatiale et temporelle des flux de drainage en bananeraie sur andosol. Rapport d'interprétation des données lysimétriques de la parcelle Espérance Haut. Station de Neufchâteau.

CHARLIER J.B. (2004), Étude hydrologique d'un petit bassin versant bananier sur andosols en climat tropical (Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe). Rapport d'activité au CIRAD-FLHOR, laboratoire d'agronomie de Neufchâteau (Guadeloupe)

LACAS J.G. (2001), Analyse des événements pluvieux enregistrés sur la parcelle Espérance Haut à Neufchâteau. Rapport interne décembre 2001.

ROUSSEAU M. (2004). Compte rendu sur les simulations réalisées avec HYDRUS 1D. Rapport d'interprétation. CIRAD

SIMON A. (2002), Diagnostic du ruissellement sur le bassin versant bananier de Fédé – Capesterre. Rapport interne. Janvier 2002

Rapports de stage

AMORAVAIN V., (2000). Analyse du système agraire sur un bassin versant bananier en Guadeloupe. Mémoire d'ingénieur ISARA-CNEARC, Montpellier, 88 p. + annexes

ANDRIEUX N., (2001). Identification des déterminants des pratiques culturales favorisant les transferts de sol, pesticides, et engrais par ruissellement en zone bananière de Guadeloupe. Mémoire de DEA, Université Paris VII.

BERGER A., (2002). Gestion des assolements dans les petites exploitations bananières de Guadeloupe : Quelles alternatives à la monoculture bananière ? Mémoire de fin d'étude DAA « Agroenvironnement », ENSAM, 56p.

DUFEAL D., (2001). Diagnostic territorial en zone bananière. Etude d'une petite région rurale : la section de l'Habituée. ENITACF, Option Agriculture et Territoire, 40p. + annexes.

GIRBAL N., (2003). Analyse des déterminants économiques de pratiques plus favorables à la protection de l'environnement en culture bananière en Guadeloupe. Rapport 2^e année ENSAT, 37p. + annexes.

GOVINDIN J.C., (2001). Diagnostic territorial en zone bananière. La Sarde. DESS « Développement local, Aménagement du Territoire et Gestion des Ressources Naturelles en milieu tropical », Université des Antilles et de la Guyane, 90p.

MALAVAL C. (2002). Rapport d'expérimentation sur la mobilisation d'anions et cations sur andosols en colonne de sol.

PERPINA C., (2001). Spatialisation des propriétés hydrodynamiques du sol, en relation avec les pratiques culturales et la toposéquence en zone bananière de Guadeloupe. Mémoire de fin d'étude, INH, Angers.

Articles

CABIDOCHÉ, Y.-M., DOREL, M., PAILLAT, J.-M., and ROBIN, P. (2001a). Inventaire des données scientifiques et techniques disponibles dans les DOM insulaires, relatives à la fertilisation azotée des cultures, à leur conduite, au fonctionnement des aquifères et aux phénomènes de transfert d'azote dans le milieu et à leur incidence. Proposition de recherches complémentaires pour valider les outils de fertilisation raisonnée et tester leur impact sur des bassins représentatifs (expertise commandée par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de l'Eau), INRA, Petit-Bourg (France), 68.

CATTAN, P., F. BUSSIERE and A. NOUVELLON (soumis à J of Hydrol.). Rainfall partitioning in banana plantations, consequences on runoff risk potential on andisols.

CATTAN P., CABIDOUCHE Y.-M., LACAS J.-G., VOLTZ M., (accepté). Impact of tillage and mulching on runoff occurrence on high infiltrability andosols under banana cropping systems. Soil Tillage and Management.

CLERMONT-DAUPHIN C., CABIDOUCHE Y.M., MEYNARD J.M., (2004). Effects of intensive mono-cropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. Soil Use and Management, 20 (2): 105-113 .

DULCIRE M., CATTAN P. (2002). Monoculture d'exportation et développement agricole durable : cas de la banane en Guadeloupe. Cahiers/Agricultures, 11, 313-321.

Communications

BASSETTE C. and BUSSIERE, F. (2004). "Rainfall distribution modelling on a 3-D plant architecture: Application to Banana tree" In Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models (Eds. Godin C., Hanan J., Kurth W., Lacoite A., Takenaka A., Prusinkiewicz P., Dejong T., Beveridge C., Andrieu B., editor, UMR AMAP, Montpellier, 157-163.

BONIN, M., CATTAN, P., DOREL, M., MALEZIEUX, E. (2004). (communication acceptée) L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux. Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. Les Entretiens du Pradel, 8 au 10 septembre 2004 - Domaine Olivier de Serres - le Pradel.

CABIDOUCHE, Y.-M., CATTAN, P., DOREL, M., and PAILLAT, J.-M. (2003). "Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués." In S. Marlet and P. Ruelle, (eds). "Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation". Actes du séminaire, mai 2002, Cd-Rom Cirad, Montpellier (France), (texte intégral).

CATTAN P., DULCIRE M. (2003). Quelles cohabitations de la banane et des autres activités territoriales ? Recherche-action dans le croissant bananier Guadeloupéen. Colloque Organisation spatiale et gestion des ressources et des territoires ruraux, février 2003, Montpellier, France.

DULCIRE M., CATTAN P. (2002). The contribution of banana cultivation to sustainable development : analysis by system of activity. In Fifth IFSA European Symposium, Florence, Italy, April 8-11 2002, 440-449.

DULCIRE M., CATTAN P. (2002). Strategic Diagnosis in an export monoculture area. In 17th Symposium of the International Farming Systems Association (IFSA), November 17-20, 2002 / Orlando, Florida USA

LACAS, J.G., VOLTZ, M., CATTAN, P. (2004). Numerical evaluation of passive capillary samplers. European Geosciences Union. 1st General Assembly Nice, France, 25 - 30 April 2004.

SANSOULET J., CABIDOUCHE Y.M., CATTAN P., CLERMONT-DAUPHIN C., DESFONTAINES L., MALAVAL C. (2004) Solute transfert in an andisol of the French West Indies after application of KNO₃ : from the agreggate to the field experiment. Volcanic Soil Resources in Europe final joint meeting. Akureyri – Egilsstadir, Iceland. June 4-8, 2004

TABLE DES MATIERES

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET	2
1.1 Contexte	3
1.2 Objectifs généraux du projet	3
1.2.1. De mieux connaître les impacts de l'agriculture sur l'environnement	3
1.2.2. De proposer des alternatives aux pratiques existantes	3
MIEUX CONNAITRE LES IMPACTS DE L'AGRICULTURE SUR L'ENVIRONNEMENT	4
Partie 1. Incidence des pratiques agricoles sur les fonctions environnementales des sols	5
1. Impact du travail du sol, de l'application d'engrais, et de zoocides sur les états et propriétés biologiques et physico-chimiques des sols	5
1.1 Matériel et Méthodes ; Réalisation	5
1.2 Résultats	7
1.2.1. Impact du travail du sol :	7
1.2.2. Impact des zoocides	7
1.2.3. Impact de la fertilisation	8
2. Effet des pratiques culturales sur les propriétés hydrodynamiques des sols.	9
2.1 Réalisation	9
2.2 Résultats	9
Partie 2. Quantification des transferts d'eau et de pesticides a l'echelle locale	11
1. Fonctionnement hydrologique distribué à l'échelle locale	11
1.1 Redistribution de la pluie	11
1.2 Flux de ruissellement et de drainage	13
1.2.1. Réalisation	13
1.2.2. Ruissellement	16
1.2.3. Drainage	18
2. Elution des ions dans les andosols	19
2.1 Elution des ions en colonnes de sol	19
2.2 Elution des ions dans les eaux de drainage	20
2.3 Concentration ioniques dans les eaux de ruissellement	22
2.4 Bilan de l'azote nitrique et du potassium	22
3. Dispersion des pesticides à l'échelle parcellaire	23
3.1 Problématique	23
3.2 Comportement des pesticides dans le sol	24
3.2.1. Protocole	24
3.2.2. Résultats	24
3.3 Evaluation d'un bilan pesticide à l'échelle parcellaire	26
3.3.1. Protocole	26
3.3.2. Stockage des pesticides dans le sol	26
3.3.3. Dispersion des pesticides dans les eaux de drainage	27
3.3.4. Dispersion des pesticides dans les eaux de ruissellement	27
3.3.5. Conclusion	28
3.4 Recherche d'une modélisation de la cinétique de concentration en cadusafos dans les eaux de drainage	28
Partie 3. Quantification des transferts d'eau et de pesticides à l'échelle du bassin versant	29
1. Problématique	29
2. Réalisation	29
3. Résultats	30
3.1 Caractéristiques marquantes de la pluie, du débit et des nappes	30
3.2 Schéma de fonctionnement du bassin	31
3.2.1. Typologie de crue	31
3.2.2. Analyse de la relation pluies / débits	32
3.2.3. Bilan hydrologique approché	34
3.3 Dispersion des pesticides à l'échelle du bassin versant	35

3.4 Approche cartographique des risques _____	35
3.5 Conclusion _____	36
PROPOSER DES ALTERNATIVES AUX PRATIQUES EXISTANTES _____	37
Partie 1. analyse de la diversité des pratiques et de leurs justifications _____	38
1. Le bassin versant de la rivière Pérou _____	38
2. L'Habitué _____	39
2. L'Habitué _____	40
3. La Sarde _____	41
4. Eléments de synthèse sur les caractéristiques des exploitations _____	41
5. Conclusion _____	42
Partie 2. conditions d'adoption des innovations destinées à minimiser l'impact négatif des pratiques agricoles sur la qualité des eaux : Quelles pratiques plus respectueuses de l'environnement ? Compatibilité avec les systèmes de production existants et les stratégies des exploitants _____	43
1. Trois itinéraires techniques types _____	43
2. Une voie pour limiter les apports en intrants ? Place des pratiques de jachère et de rotation dans les exploitations _____	45
3. Les pratiques favorisant les transferts de sol, pesticides et engrais par ruissellement _____	47
4. Conclusion _____	48
Partie 3. Evaluation économique des pratiques respectueuses de l'environnement et mesures incitatives. _____	49
1. Modes de calcul _____	49
2. Le gain économique de la mise en rotation banane/ananas _____	50
3. Exemple chez un pratiquant convaincu : quand le système est en place, des gains économiques conséquents et un intérêt environnemental notable _____	51
4. Exemple d'un petit producteur non pratiquant : le manque à gagner lors de la jachère est un frein majeur. Pourtant, le système à l'équilibre dégage un gain économique _____	52
5. Conclusion _____	53
CONCLUSION GENERALE _____	54
ANNEXES _____	56
Rapports d'interprétation _____	56
Rapports de stage _____	56
Articles _____	56
Communications _____	57
Table des matières _____	58