

Sommaire

Résumés		3
Remerciements		5
<hr/>		
Introduction générale		11
1^{re} Partie	Contexte et Objet de l'étude	13
Chapitre 1	La production bananière en Guadeloupe	15
I.	Le contexte de la production bananière en Guadeloupe	15
	1. Géographie	
	2. Données climatiques	
	3. Données pédologiques	
II.	Croissance et développement du bananier	17
III.	Les problèmes majeurs de la production bananière	17
	1. Contraintes agronomiques	
	2. Contraintes socio-économiques	
	3. Directives européennes	
	4. Bilan des contraintes de la culture bananière	
IV.	Le plan banane durable : vers de nouveaux systèmes de culture	20
	1. Un nouvel engagement de la filière	
	2. Les systèmes de culture bananiers innovants proposés (SdCi)	
Chapitre 2	Evaluer des systèmes de culture	24
I.	L'évaluation de la durabilité	24
	1. Le caractère multicritère et pluriannuelle de l'évaluation de la durabilité	
	2. Les méthodes d'évaluation de la durabilité	
II.	La construction d'indicateurs	25
	1. Définition	
	2. La démarche de construction des indicateurs	
Chapitre 3	Problématique et démarche de construction des indicateurs	27
I.	Problématique	27
II.	Démarche générale	27
2^{ème} partie	Construction des indicateurs Agro-environnementaux et Economiques	29
Chapitre 1	Les objectifs et les indicateurs à construire	31
I.	Premier objectif : Diminution des traitements herbicides	31
II.	Objectifs 2 et 3 : Maintien de la qualité des sols et de la qualité de l'eau	31
III.	Objectif 4 : Maintien du revenu des producteurs	33
Chapitre 2	Objectif de réduction des traitements herbicides	
	Un indicateur de la charge en herbicide	34
I.	Les indicateurs de suivi des traitements herbicides	34
II.	La référence de traitement herbicide	36
III.	Conclusion	36

Chapitre 3	Objectif de préservation des sols et de l'eau	37
Partie A :	Le vers de terre, un indicateur biotique de la qualité du sol	37
I.	Les vers de terre comme bio-indicateur de la qualité des sols	37
II.	Mise au point de la méthode d'échantillonnage	39
Partie B :	L'indicateur de risque érosif	41
I.	Le fonctionnement hydrique des sols	41
1.	Modèle de fonctionnement hydrique des sols	
2.	Relation Ruissellement-Erosion-Couverture du sol	
II.	Adaptation du modèle de Diskin et Nazimov	43
III.	Simplification de l'indicateur	45
1.	Exemple de calcul de l'érosion hydrique	
2.	L'Indicateur simplifié de risque érosif	
Partie C :	L'Indicateur de la capacité d'épuration des sols	49
I.	Evolution des produits phytosanitaires dans les sols	49
II.	Les indicateurs existants	49
III.	Construction de l'indicateur	52
IV.	Discussion - Conclusion	52
Chapitre 4	Objectif de maintien du revenu des producteurs	54
Partie A :	L'Indicateur de Rendement	54
I.	Les outils disponibles pour construire l'indicateur de rendement	54
1.	Le modèle SIMBA	
2.	Les résultats d'essais	
II.	Définition des paramètres d'entrées du modèle SIMBA	55
1.	Le rayonnement global	
2.	La température	
III.	Discussion - Conclusion	56
Partie B :	La rentabilité des systèmes de cultures	57
I.	Le produit brut	57
1.	Le prix de vente	
2.	Le rendement	
3.	Les aides	
II.	Les coûts de production	57
Conclusion de la 2^{ème} partie		59
3^{ème} Partie	Evaluation des Systèmes de Culture Innovants	61
I.	Le dispositif d'étude	63
II.	L'évaluation agro-environnementale	63
1.	L'IFT Herbicide	
2.	La qualité des sols	
3.	Le risque érosif	
4.	La capacité d'épuration des sols	
III.	L'évaluation économique	69
1.	Le rendement	
2.	La marge nette	
Conclusion de la 3^{ème} partie		71
Perspectives de travail		73
I.	La validation des indicateurs	73
II.	L'amélioration des Systèmes de Culture innovants proposés	73
III.	La diffusion des Systèmes de Culture innovants auprès des producteurs	74
Conclusion générale		75
Références bibliographiques		77
Annexes		85

Index des Figures et des Tableaux

Figure 1 :	Carte de la Guadeloupe et sole bananière (Cornaille, 2002)	14
Figure 2 :	Le bananier (d'après Champion, 1963)	16
Figure 3 :	Système de Culture Innovants bananiers	22
Figure 4 :	Densité moyenne de vers de terre par prélèvement en fonction de la méthode d'échantillonnage	38
Figure 5 :	Modèle de génération du ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Diskin et Nazimov, 1995, modifié)	40
Figure 6 :	Erosion en fonction du pourcentage de couverture de sol (Wischmeier et Smith, 1978)	42
Figure 7 :	Somme journalière de la quantité d'eau ruisselée calculée à partir des pluies à la minute, en fonction des pluies journalières	44
Figure 8 :	Indicateur de sensibilité du sol à l'érosion	46
Figure 9 :	Processus impliqués dans le devenir des produits phytosanitaires dans les sols, conditionnant leur disponibilité et par conséquent, leur efficacité phytosanitaire et la manifestation de leur caractère polluant (Bariusso et al., 1994 ; modifié)	48
Figure 10 :	Indicateur de la capacité d'épuration des sols	51
Figure 11 :	Structure du module SIMBA GROW	54
Figure 12 :	Valeurs mensuelles moyennes et variation minimale du prix de vente de la banane à l'importation en Martinique sur la période 1999 à 2004 (SNM 2005 et ODM 2005 in Tixier et al., 2007, modifié)	58
Figure 13 :	Densité moyenne de vers par prélèvement en fonction du traitement.	64
Figure 14 :	Evolution du risque érosif sur un cycle de culture pour les différents systèmes de culture	66
Figure 15 :	Position relative de chacun des traitements dans le tableau Indicateur de la capacité d'épuration des sols.	66
Tableau 1 :	Contraintes majeurs de la production bananière.	20
Tableau 2 :	Objectifs de durabilité des SdCi pour les dimensions agro-environnementale et économique	30
Tableau 3 :	Matrice croisant les objectifs de la durabilité poursuivis avec les indicateurs chargés de les caractériser.	32
Tableau 4 :	Calcul de l'IFT de référence à partir des données enregistrées et des projections	36
Tableau 5 :	Modèles de régression linéaire obtenus pour des K_{sat} de 10 à 150 mm.h ⁻¹	44
Tableau 6 :	Variables du module SIMBA GROW	54
Tableau 7 :	Moyenne des températures enregistrées toutes les 20min pour chaque traitement du 18 juin 2010 au 19 août 2010	56
Tableau 8 :	Les postes d'investissement de la filière banane (De Barros et al., 2009, modifié)	58
Tableau 9 :	Calcul de l'IFT Herbicide des SdCi à partir des données enregistrées	62
Tableau 10 :	Conductivité hydraulique et Couverture du sol à la plantation et huit mois plus tard	64
Tableau 11 :	Sorties du modèle SIMBA GROW	68
Tableau 12 :	Bilan de l'évaluation des SdCi avec les indicateurs construits	70

Introduction générale

La banane dessert constitue la principale production agricole de la Guadeloupe. Il y a actuellement, associés à cette production, des problèmes de durabilité agronomique, dus à la dégradation physique, chimique et biologique des sols, des problèmes de durabilité environnementale dus à la pollution de la ressource en eau par les produits phytosanitaires, et des problèmes économiques liés au coût élevé de la main d'œuvre nécessaire sur les plantations.

Dans ce contexte, la filière banane antillaise s'est engagée en 2008 dans le plan « Banane Durable » avec l'ambition de conjuguer progrès économique, en assurant la pérennité de la filière, progrès social, en améliorant la formation et les conditions de travail, et progrès environnemental en diminuant l'impact de la production sur les milieux environnants.

Afin d'améliorer la durabilité de la production, le CIRAD* a mis au point deux systèmes de culture innovants qui associent les bananiers à une plante de couverture pérenne ou à un paillis. Ces systèmes doivent maintenant être évalués en termes de production, de rentabilité, d'impact environnemental et de possibilité d'adoption par les producteurs.

L'objectif de ce stage de six mois réalisé au sein de l'UPR 26** du CIRAD en Guadeloupe, a été de mettre au point des indicateurs agro-environnementaux et économiques pour permettre l'évaluation de ces systèmes de culture innovants.

Dans la première partie de ce mémoire, le contexte général de la production bananière en Guadeloupe est tout d'abord exposé. Ce travail permet de mettre en lumière les problèmes majeurs rencontrés dans la production et les solutions apportées par les acteurs de la filière qui doivent être évaluées. Aussi, une revue bibliographique sur la construction d'indicateurs associés à l'évaluation de la durabilité de systèmes de culture fait suite à cette présentation. Cette première partie se termine par l'exposition de la démarche suivie pour élaborer les indicateurs. La seconde partie présente les indicateurs agro-environnementaux et économiques retenus et le processus de leur construction ou de leur adaptation au contexte guadeloupéen. Dans la troisième partie, les indicateurs sont mobilisés pour évaluer les systèmes de culture mis au point par le CIRAD afin d'émettre un premier jugement quant à leur faisabilité et leurs impacts environnementaux.

* CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (**Annexe 1**)

** UPR 26 : Unité Propre de Recherche (**Annexe 1**)



1^{ère} partie

Contexte et objet de l'étude

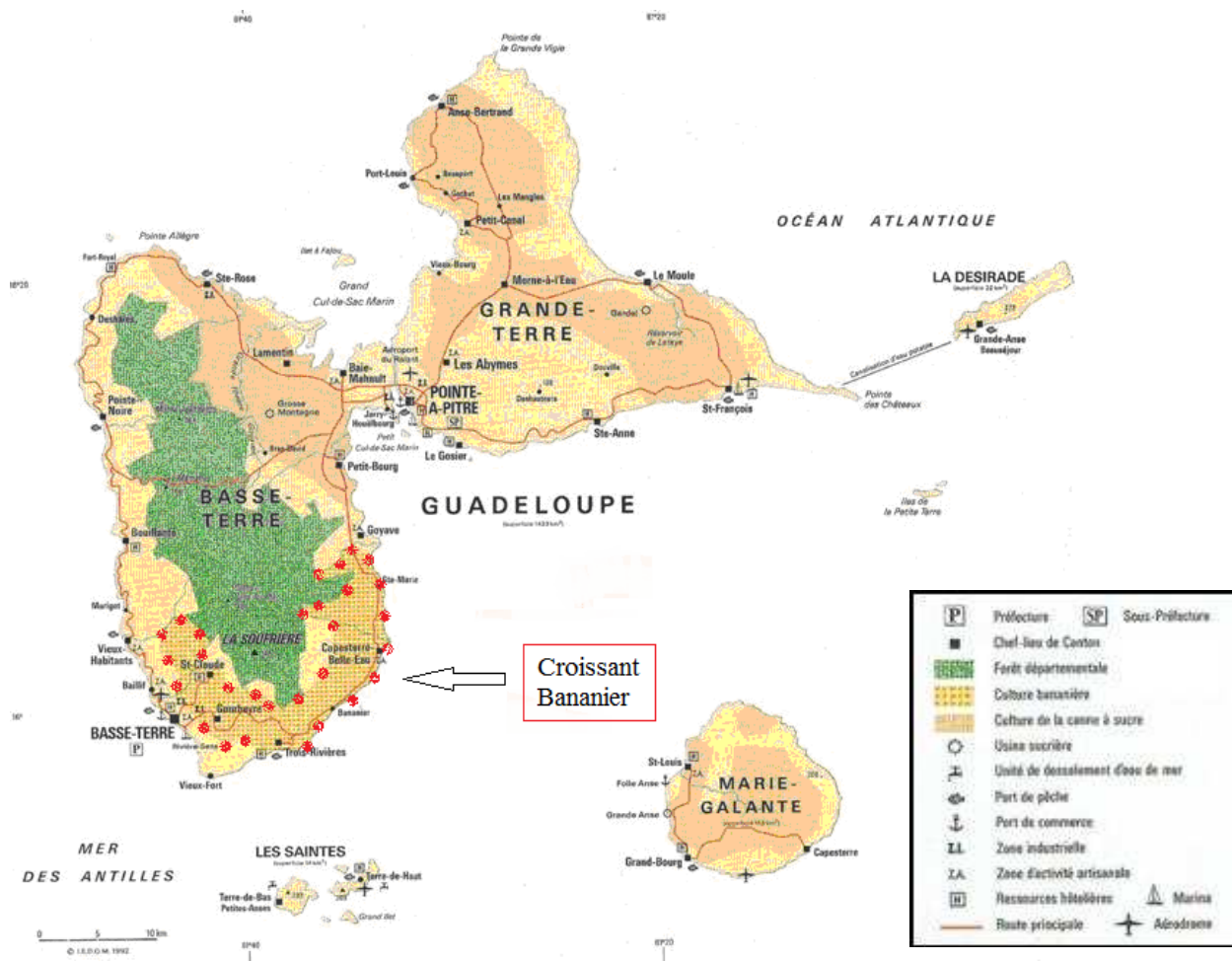


Figure 1 : Carte de la Guadeloupe et sole bananière (Cornaille, 2002)

Chapitre 1

La production bananière en Guadeloupe

I. Le contexte de la production bananière en Guadeloupe

1. Géographie

L'archipel guadeloupéen (16°15'N, 61°32'O), département d'outre mer français et région ultrapériphérique européenne, est situé au milieu de l'arc insulaire des Petites Antilles. Il est constitué de huit îles dont les deux principales sont la Basse-Terre (848km²) et la Grande Terre (590km²). Elles sont séparées par un bras de mangrove appelé la « Rivière salée ». La capitale économique est la ville de Pointe à Pitre, située sur l'île de Grande-Terre et le centre administratif est Basse-Terre, située sur l'île du même nom (**Figure 1**).

En Guadeloupe, l'agriculture contribue pour 6% au produit brut régional, emploie 12% de la population active et couvre le tiers de la superficie de l'île (source : **AGRESTE 2010**). Les deux piliers de la production sont la culture de la canne à sucre et la culture de la banane dessert qui est devenue la première production et exportation de la Guadeloupe. En 2008, la surface récoltée de banane d'exportation était de 2110ha. Cette production antillaise n'est qu'une faible part de la production mondiale qui est actuellement localisée en Asie, en Amérique Latine et en Afrique (**Site Région Guadeloupe**).

2. Données climatiques

La Guadeloupe bénéficie d'un climat tropical, tempéré par les influences maritimes et les alizés. Une saison sèche appelée « carême » qui s'étale de janvier à juin alterne avec une saison humide appelée « hivernage » de juillet à décembre. La moyenne des températures annuelles est de 27°C avec peu de variations mensuelles. La Grande-Terre, plateau de calcaire corallien, connaît régulièrement de sévères sécheresses, alors que dans le même temps, le relief perpendiculaire au flux des alizés de la Basse-Terre régule le régime des pluies.

La majeure partie de la production bananière est concentrée sur l'île volcanique de Basse Terre dans la zone dite du « croissant bananier » comprise entre les communes de Goyave et de Vieux Habitants (**Figure 1**). La production s'étage entre 50m et 800m sur les flancs du volcan de la Soufrière où l'on distingue la zone exposée aux Alizés appelée « la côte au vent » caractérisée par un gradient pluviométrique de 2500 à 10000mm d'eau par an, et la zone protégée des Alizés dite « la côte sous le vent » où le gradient pluviométrique varie de 1000 à 5000mm par an.

On distingue donc en culture bananière :

- des zones de plaine mécanisables irriguées ou non ;
- des zones de montagne difficilement mécanisables, irriguées ou non, au-delà de 250m.



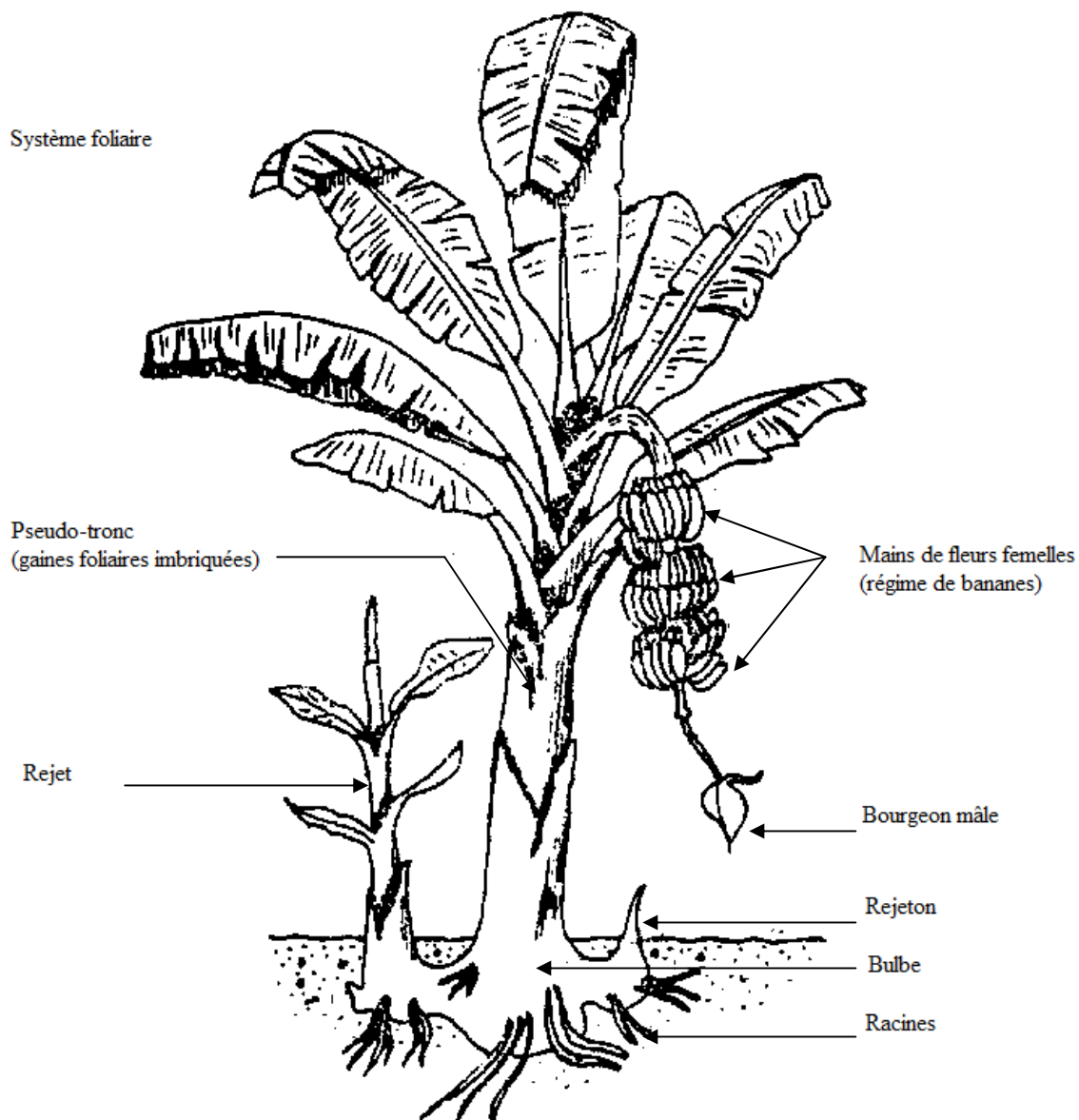


Figure 2 : Le bananier (d'après Champion, 1963)

3. Données pédologiques

Les sols de Basse Terre sont caractérisés par une grande diversité, classique dans une zone tropicale humide (**Delvaux et al., 1989**).

Dans la zone du croissant bananier, on observe :

- des andosols perhydratés à gibbsite entre 500m et 300m,
- des andosols entre 300m et 150m,
- des sols bruns ayant conservé certains caractères andiques dans les horizons profonds entre 150m et 100 m,
- des sols bruns rouilles à halloysite dépourvus de caractères andiques et fortement ferrallitisés dans les zones les plus basses.

La majorité des parcelles de bananes sont implantées sur des andosols. Les andosols, ou sols à allophane (complexe amorphe de silicate d'alumine), sont établis sur des projections andésitiques cendreuses, à éléments vitreux et très perméables, sous climat à précipitations abondantes sans saison sèche marquée. La porosité est importante (70 à 80%), essentiellement composée de micropores constamment saturés en eau (**Colmet-Daage, 1965**) et ils sont riches en matière organique (9 à 10 %). Ils présentent donc naturellement une structure favorable à l'enracinement du bananier avec de fortes réserves en eau et une bonne aération du fait de l'importance de la porosité.

II. Croissance et développement du bananier

Le bananier est une « herbe géante » monocotylédone à rhizome, sans tige végétative aérienne. C'est au niveau du rhizome que se différencient les rejets caractérisés par une imbrication des gaines foliaires formant le pseudotrunc au centre duquel « monte » l'inflorescence dont la fleur femelle donnera le régime de bananes (**figure 2**). Chaque pied issu d'un rejet latéral produit un régime de bananes puis meurt et est remplacé par un rejet successif sélectionné par le planteur. Un cycle de production peu se répéter 1 à 50 fois ce qui fait du bananier une plante pérenne (**Turner, 1994**). Chaque bananier se développe à son propre rythme ce qui entraîne une désynchronisation des cycles au niveau de la parcelle. En pratique, les parcelles sont conservées 5 à 6 ans, en culture semi pérenne.

Le développement du bananier se caractérise par deux stades clefs par cycle, le stade floraison qui marque la fin de la phase de croissance et le début du développement du régime, et le stade récolte. Pour la variété grande naine du groupe des Cavendish (variété la plus utilisée aux Antilles Françaises), on compte un total de 900 degré-jour en base 14 entre la floraison et la récolte (**Ganry J. et Chillet M., 2008**).

III. Les problèmes majeurs de la production bananière

Les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe sont soumis à de fortes contraintes agronomiques et socio-économiques.

1. Contraintes agronomiques

a) Parasitisme et pollution du milieu

Les systèmes bananiers sont majoritairement des systèmes monocultureux dans lesquels se développe un parasitisme spécifique. Les deux contraintes majeures sont le parasitisme tellurique et les cercosporioses, maladies fongiques.

Les cercosporioses noires et jaunes sont les deux maladies fongiques les plus préoccupantes pour les producteurs.

La cercosporiose jaune, due à *Mycosphaerella musicola* Leach est la forme présente en Guadeloupe. Son traitement se fait par voie aérienne avec épandage d'un mélange de fongicides et d'huiles minérales environ 10 fois par an.

La cercosporiose noire est la forme la plus virulente. Provoquée par *Mycosphaerella fijensis* Morelet, elle est présente partout dans le monde excepté en Guadeloupe, en Martinique et en Dominique où elle représente une menace éminente. La cercosporiose noire nécessite une moyenne de 30 à 40 traitements aériens par an. Ces traitements, limités en Guadeloupe par arrêté préfectoral, ne pourraient pas être conduits aux Antilles françaises. En l'absence de variétés résistantes, le maintien de la sole bananière dans les Antilles française serait largement menacé en cas d'intrusion de cette maladie.

Le complexe parasitaire du sol est dominé par les nématodes phytoparasites (particulièrement *Radopholus similis* hautement inféodé au bananier) et les charançons dont les larves provoquent des lésions au niveau du bulbe du bananier et des insertions racinaires qui peuvent entraîner la chute du bananier et des troubles trophiques.

Le traitement nématicide et insecticide est réalisé une à trois fois par an avec un produit mixte, le Nemathorin. C'est un traitement à base de particules organophosphorées et non plus à base de particules organochlorées interdites depuis 1993, mais sa toxicité reste élevée et il se retrouve dans les eaux de ruissellement et de drainage des parcelles cultivées (Tixier, 2007).

b) Monoculture et dégradation des sols

Les systèmes de culture bananiers intensifs sur sols nus sur des versants accidentés peuvent être à l'origine d'une érosion hydrique en raison des pluies tropicales particulièrement agressives (Khamssouk et Roose, 2003). En Guadeloupe, la sole bananière est implantée sur un andosol ; c'est un sol fertile qui se développe sur roche volcanique, riche en matière organique dans lesquels il y a une forte infiltration. L'érosion hydrique est donc faible mais contribue cependant à la dégradation des sols nus (Khamssouk et Roose, 2003). Les sols sont également dégradés de manière importante par :

- l'effet de la mécanisation (Dorel, 2001) ;

- la surexploitation du sol liée à un non retour de matière organique (Dorel, 2001).

La dégradation entraîne une diminution de la fertilité des sols du fait de la modification de la structure du sol (compaction, faible macroporosité et conductivité hydraulique réduite) (Dorel, 2001).

c) Aléas climatiques et catastrophes naturelles

La production de banane en Guadeloupe est fortement tributaire des aléas climatiques et des catastrophes naturelles ; en 1998, l'ouragan Georges avait détruit 85% de la bananeraie Guadeloupéenne et plus récemment le dépôt des cendres du 11 février 2010 provenant de la Soufrière de Montserrat a entraîné une perte estimée à 20 000 tonnes de bananes (France-Antilles, 4 mars 2010).

2. Contraintes socio-économiques

Les exploitations bananières doivent également affronter la concurrence de la « banane dollar ». Financée par les États-Unis, la banane des pays d'Amérique latine est favorisée par un faible coût de production.

Le surcoût de la banane antillaise provient particulièrement :

- de la topologie des exploitations : les pentes importantes des exploitations situées sur les flancs du volcan génèrent des surcoûts pour l'aménagement de la voirie notamment ;
- de l'échelle des exploitations : les exploitations latino-américaines s'étendent sur des centaines d'hectares de terrains plats ce qui permet d'abaisser le coût de production ; en Guadeloupe, 60% des exploitations ont une taille inférieure à 5 hectares ; on ne relève que 4,5% d'exploitations de taille supérieure à 30 hectares qui assurent cependant 45% du tonnage exporté ;
- le coût de la main d'œuvre : aux Antilles, le salaire journalier est de 73,6 euros contre 6,2 euros au Costa Rica et 3,6 euros en Equateur. Or la part salariale représente 40 % du coût de production (**IEDOM**).

3. Directives européennes

Suite au Grenelle de l'environnement de 2007, a été mis en place le plan Ecophyto 2018 qui vise à réduire de 50% l'utilisation des produits phytosanitaires d'ici 2018. Il s'agit à la fois de réduire l'usage de ces produits et de limiter l'impact de ceux qui resteront indispensables pour protéger les cultures des parasites, des mauvaises herbes et des maladies.

La Guadeloupe est également concerné par ce plan dont l'axe 6, nommé Ecophyto DOM, concerne les départements d'outre mer et vise à prendre en compte leur spécificité afin d'atteindre l'objectif du plan Ecophyto 2018.

4. Bilan des contraintes de la culture bananière

Le rendement moyen des plantations guadeloupéennes est faible (environ 20 tonnes/ha en 2003) et bien en deçà du potentiel agricole. Celui-ci se définit comme le rendement pouvant être atteint, pour un système de culture donné, avec une parfaite maîtrise de l'ensemble des techniques culturales (**Boiffin et Sébillote, 1982**). Le rendement pour la culture de banane en Guadeloupe peut être estimé à 60% du potentiel. L'ensemble des contraintes détaillées ci-dessus auquel s'ajoute de fréquents conflits sociaux expliquent en grande partie cette faible productivité (**Malessard, 1999**) (**Tableau 1**).

IV. Le plan banane durable : vers de nouveaux systèmes de culture

1. Un nouvel engagement de la filière

De 1996 à 2006, les producteurs de banane de Guadeloupe et de Martinique ont diminué de 60% l'usage des pesticides par la prise en compte des contraintes agronomiques et en y apportant une réponse adéquate (choix de molécules moins toxiques pour les traitements et diminution des doses appliquées ; utilisation à la plantation de plants issus de la culture in vitro sain, dépourvus de nématodes ; rotation des parcelles cultivées et des jachères afin d'assainir les parcelles et de lutter contre le parasitisme tellurique).

Afin de poursuivre sa démarche de développement durable, la filière s'est engagée en 2008 dans le plan « Banane durable » qui revendique l'ambition de conjuguer progrès économique en assurant la pérennité de la filière, progrès social en défendant les conditions de travail des planteurs et des salariés de la filière, l'évolution de carrière via la formation et les transferts de compétences, et progrès environnemental en réduisant encore l'impact environnemental de la production.

Contraintes	
Agro-écologiques	Cercosporiose
	Parasitisme tellurique
	Pollution des eaux
	Dégradation des sols
	Aléas climatiques et catastrophes naturelles
Socio-économiques	Coût de la main d'œuvre
	Topologie des exploitations
	Echelle des exploitations
Politiques	Ecophyto 2018

Tableau 1 : Contraintes majeurs de la production bananière.

Les axes I et II du plan « Banane durable » concerne la mise au point d'innovations par la recherche permettant d'améliorer la durabilité des systèmes de culture de banane. Ceci passe par la prise en compte des contraintes de production et l'apport de réponses respectueuses de l'environnement (variétés résistantes aux cercosporioses, méthodes culturales innovantes, etc). Dans ce contexte, deux plateformes ont été créées ; une plateforme de Sélection variétale dont l'objectif principal est de mettre au point des variétés commercialisables résistantes aux cercosporioses ; une plateforme Systèmes de culture* qui axe son travail sur la mise au point de systèmes de culture répondant aux critères de la durabilité.

L'objectif de la plate forme Systèmes de culture est de mettre en place et d'évaluer chez des producteurs pionniers des Systèmes de Culture innovants (SdCi) reposant sur la restauration de fonctions agro-écologiques dégradées dans les systèmes intensifs conventionnels. Pour atteindre cet objectif, trois axes de travail ont été définis :

- 1 Mise et place et suivi d'une collection de plantes de couverture ;
- 2 Mise en place de dispositifs expérimentaux chez les producteurs pionniers ;
- 3 Evaluation agro-environnementale des SdCi.

2. Les systèmes de culture bananiers innovants proposés

a) Choix des Systèmes de culture

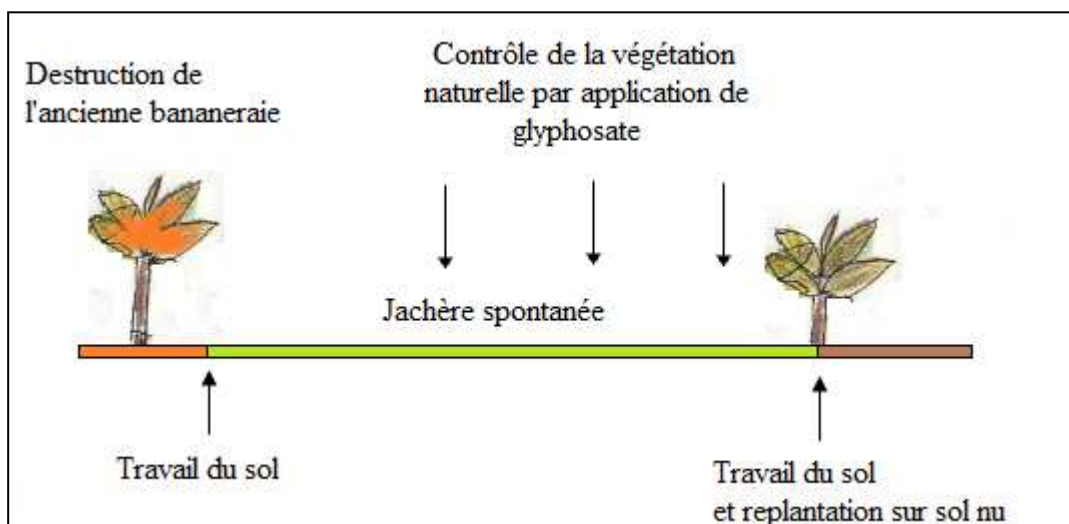
La plate forme Systèmes de culture du CIRAD, en coopération avec l'IT² (Institut Technique Tropical), a mis au point deux systèmes de culture bananiers innovants (SdCi). Les objectifs majeurs de ces SdCi sont de permettre une diminution de l'utilisation des produits phytosanitaires (herbicide et pesticide) afin de réduire l'impact environnemental de la production bananière et de répondre aux objectifs européens du plan Ecophyto 2018, sans compromettre les revenus des producteurs (**Tableau 1**).

Le choix de ces systèmes de culture a été réalisé sur la base de l'axe 1 de la plateforme. La mise en place d'une collection de plantes de couvertures a permis de sélectionner des plantes candidates à l'association avec le bananier. Ces plantes ont été retenues pour leur statut de non hôte de nématodes, leur forte densité racinaire et leur importante production de biomasse.

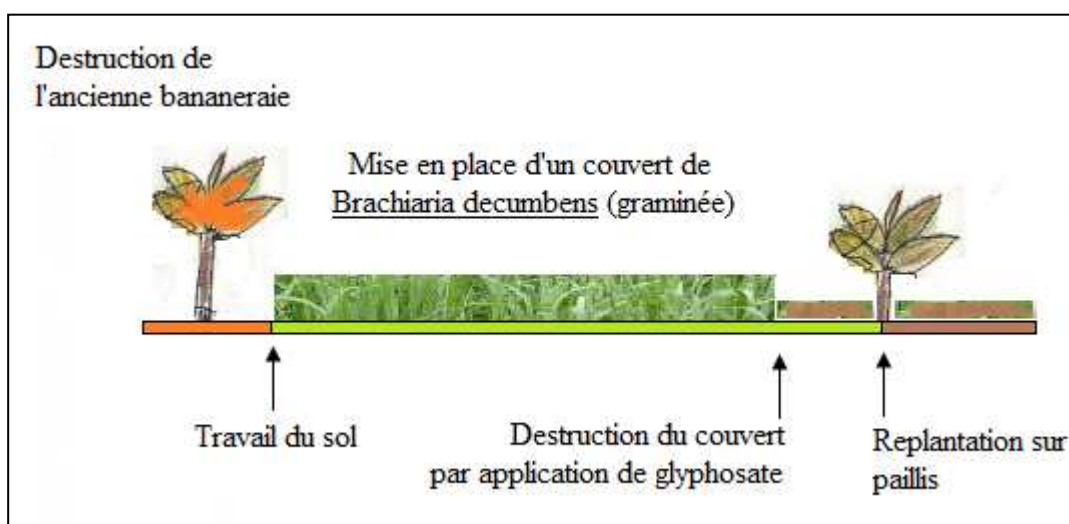
b) Description des SdCi

Le système de culture bananier le plus répandu actuellement est un système dit « Banane-Jachère » (**Figure 3a**). La bananeraie précédente est détruite au glyphosate puis une période de jachère de 12 mois minimum est installée afin d'éliminer les nématodes parasites inféodés au bananier. A l'issue de la période de jachère, le sol est travaillé puis des vitroplants (plants de bananiers obtenus in-vitro) sont plantés ce qui permet d'avoir du matériel végétal indemne de parasites et de limiter ainsi les traitements nématicides.

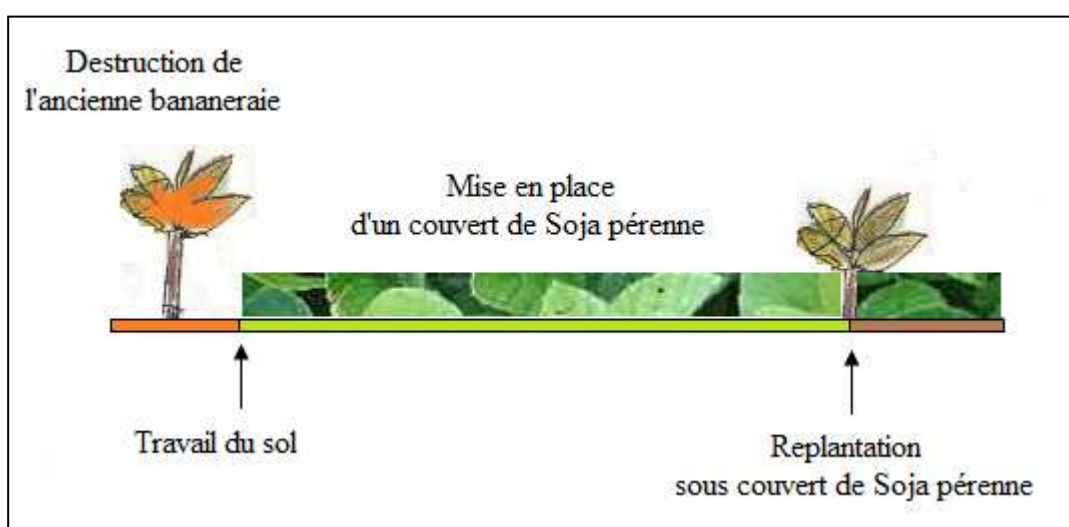
Système de culture : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une parcelle ou un ensemble de parcelles agricoles traitées de manière identique dans un contexte pédo-climatique donné ; chaque système de culture se définit d'une part par la nature des cultures et leur ordre de succession et, d'autre part, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures (**Sébillote, 1982**)



3a : Système de référence Banane-Jachère



3b : Système de culture innovant Banane-Brachiaria



3c : Système de culture innovant Banane-Soja

Figure 3 : Systèmes de culture bananiers

L'innovation proposée est d'installer une plante de couverture non hôte de nématodes à la place de la jachère spontanée afin de régénérer la fertilité des sols. La plante de couverture est soit détruite à l'issue de la période de jachère et les bananiers sont alors plantés sur paillis de *Brachiaria decumbens* (graminée) (Système « Banane-*Brachiaria* ») (**Figure 3b**), soit laissée en place et les bananiers sont alors plantés sur une couverture végétale vivante de soja pérenne (*Neonotonia wightii*) (Système « Banane-Soja ») (**Figure 3c**). La présence d'une couverture végétale doit permettre de limiter le développement des adventices sur les parcelles.

Ces systèmes reposent sur l'abandon des systèmes monocultureux intensifs conventionnels pour des systèmes de culture en association. Ils ont été sélectionnés dans l'objectif majeur de permettre une diminution des traitements herbicides en limitant la pousse des adventices. En effet, la présence d'une plante de couverture, permet de contrôler la végétation adventice sans avoir recours à une utilisation massive des herbicides (**Hollander et al., 2006**). Outre cet aspect phytosanitaire, la présence d'une plante de couverture pendant la période de jachère peut permettre d'améliorer la structure du sol via le système racinaire et de favoriser l'activité biologique du sol (**Séguy et Bouzinac, 2002**). Aussi, une plante de couverture peut permettre un recyclage des éléments minéraux, particulièrement ceux non assimilable par les bananiers (**Séguy et Bouzinac, 1989-95**). Enfin, la couverture permanente du sol doit pouvoir limiter l'érosion en protégeant le sol de l'action mécanique du vent et de l'eau (**Wischmeier, 1958 ; Wischmeier et Smith, 1978**).

Neonotonia wightii utilisé dans le système « Banane-Soja » est une légumineuse susceptible de fixer l'azote atmosphérique et de permettre ainsi un enrichissement du sol en azote (**Galiana et al., 2002**) ; cependant les essais réalisés sur la station du CIRAD ont mis en évidence, que même inoculée avec une bactérie fixatrice d'azote, *Neonotonia wightii* était peu fixatrice d'azote atmosphérique et qu'elle ne permettait pas d'envisager une diminution des apports azotés sur les parcelles de bananiers (**Dorel, communication personnelle**).

Ces systèmes innovants mis en place en station expérimentale doivent maintenant être évalués globalement en termes de productivité, de rentabilité, d'impacts environnementaux et de possibilité d'adoption par les producteurs. Cette évaluation doit permettre d'améliorer et de d'étendre ces dispositifs chez des producteurs pionniers.

Chapitre 2

Evaluer des systèmes de culture

I. L'évaluation de la durabilité

Le développement durable est « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (**Brundtland, 1987**). Appliquer à l'agriculture, ce concept amène à s'intéresser à la fois à la durabilité du système agricole proprement dit et à sa contribution au développement durable (**Réau et Doré, 2008**).

L'évaluation est une étape majeure du processus de conception et de diffusion de systèmes de culture (**Réau et Doré, 2008**). Elle peut être réalisée :

- a priori, lors d'une démarche de conception à dire d'experts permettant de trier les systèmes candidats et de ne soumettre à l'expérimentation que les plus prometteurs ;
- a posteriori, au terme d'une mise en situation expérimentale, en station ou en parcelle d'agriculteur ;
- après une extension de l'innovation à une gamme pédoclimatique suffisante, dans le but d'en apprécier la validité et d'en préciser plus largement le domaine d'application.

1. Le caractère multicritère et pluriannuelle de l'évaluation de la durabilité

L'évaluation d'un système de culture consiste à apprécier l'atteinte de plusieurs objectifs au travers de différents critères, la cohérence agronomique de l'ensemble des choix et les effets cumulatifs de la succession des cultures (**Nolot et Debaeke, 2003**). La difficulté méthodologique majeure est bien la prise en compte du caractère multicritère et pluriannuelle de l'évaluation du système de culture. Aujourd'hui l'évaluation globale des systèmes de culture porte sur les trois piliers du développement durable : l'environnement, l'économie et le social. Les critères d'évaluation sont généralement calculés pour une parcelle sur une année, puis une intégration pluriannuelle est proposée pour caractériser les effets cumulatifs du système de culture. Le passage à l'échelle pluriannuelle se fait soit en réalisant une moyenne des critères annuelles, soit en cumulant la valeur du critère sur la durée de la rotation.

2. Les méthodes d'évaluation de la durabilité

Parmi les méthodes d'évaluation disponibles en France qui s'intéressent aux trois dimensions de la durabilité, deux groupes se distinguent :

- les méthodes qui permettent de réaliser un diagnostic à l'échelle de l'exploitation agricole du type IDEA* (**Vilain, 2008**) ;
- les méthodes qui permettent une évaluation de la durabilité à l'échelle du système de culture du type MASC* (**Sadok et al., 2007**) ; c'est un outil fondé sur une représentation hiérarchique des critères de la durabilité ; la satisfaction de chaque critère étant renseigné par un indicateur relevant en partie de différentes méthodes éprouvées (e.g. INDIGO* pour la dimension environnementale, IDEA pour la dimension économique).

II. La construction d'indicateurs

1. Définition

Un indicateur désigne une variable (indicateur simple) ou une combinaison de variables (indicateur composite ou synthétique) à laquelle on a donné du sens en la positionnant par rapport à un seuil. Un indicateur est destiné à renseigner sur une situation complexe ou une réalité non observable ou difficilement quantifiable, par agrégation de données qui, elles, sont accessibles. Un indicateur doit permettre d'aider un utilisateur dans son action (prise de décision, construction d'un programme d'action, modélisation, etc.) (Reau et Doré, 2008).

On distingue deux grandes catégories d'indicateurs (Van der Werf et al., 2002) :

- les indicateurs basés sur la pratique (indicateurs de moyens ou de risques) ;
- les indicateurs basés sur les effets estimés de ces pratiques (indicateurs d'effets ou d'impact).

Les indicateurs d'impacts sont jugés préférables aux indicateurs de moyens car le lien avec le critère évalué est direct (Van der Werf et al., 2002).

D'autres typologies existent, se basant notamment sur le niveau d'agrégation des données (Girardin et al, 1996). Dans cette typologie, les données brutes caractérisent les pratiques agricoles, elles sont collectées chez l'agriculteur mais ne permettent pas de juger de « l'état » du système. Les indicateurs simples résultent de l'agrégation des données brutes et donnent l'impact d'une pratique sur une thématique environnementale (ex : pollution diffuse de l'eau par les produits phytosanitaires). Les indicateurs composites résultent quant à eux de l'agrégation d'indicateurs simples et donnent un résultat plus complet de l'impact d'une activité sur toutes les thématiques ou l'inverse, l'impact de toutes les pratiques sur une thématique particulière. Enfin, l'indicateur système agrège tous les indicateurs composites et permet d'évaluer globalement l'impact d'une exploitation agricole sur l'environnement.

Il existe plusieurs méthodes d'agrégation permettant de passer du stade « données brutes » au stade « indicateur » (Devillers et al., 2005), chacune possédant leurs avantages et leurs inconvénients :

- Les agrégations mécanistes : les variables sont assemblées par le calcul (à l'aide d'équations ou de modèles). Ces agrégations donnent des résultats précis mais leur construction est complexe et leur compréhension difficile.
- Les agrégations par notation : les variables sont associées après avoir été converties en « notes » à l'aide de classes. La compréhension de la méthode est plus facile mais le problème des limites de classes apparaît (chaque classe étant délimitée par des seuils d'appartenance, une variable située à la limite supérieure d'une classe appartient à celle-ci malgré qu'elle soit très proche de la suivante).
- Les agrégations hybrides : elles réunissent les deux méthodes précédentes. Dans un cas, une seule partie des variables est transformée en note puis intégrée dans des calculs avec l'autre partie. Dans l'autre cas, ce sont les résultats finaux de ces calculs qui sont convertis en notes. Cela permet d'éviter certains inconvénients des deux agrégations précédentes hormis celui des limites de classes.
- Les agrégations par systèmes experts : elles se basent sur des arbres de décisions (fruit de l'expertise). Elles permettent d'agréger des variables de nature différente et leur construction simple permet une utilisation à des fins pédagogiques. Le problème des limites de classes subsiste néanmoins.
- L'analyse multicritère : cette agrégation n'a pas pour but de synthétiser des variables mais de classer et d'ordonner des données.

2. La démarche de construction des indicateurs

La méthode proposée ci-après est celle définie par **Mitchell (1995)** ; elle est issue de la démarche scientifique générale associée à la construction d'indicateurs et se décline en cinq étapes :

1. Définir les objectifs : décliner dans un cadre conceptuel le principe de la durabilité en des objectifs clairement identifiés ;
2. Choisir les hypothèses et les variables motrices : construire une matrice qui croise les objectifs poursuivis avec les indicateurs chargés de les caractériser ;
3. Créer les indicateurs associés : poser les hypothèses et les choix de départ pour la construction des indicateurs et leur mode de calcul ;
4. Déterminer les seuils de référence ou le choix de normes
5. Valider les indicateurs

IDEA : Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles

MASC : Multi-attribute of the Assessment of the Sustainability of Cropping systems

INDIGO : série de 10 indicateurs agri-environnementaux qui permettent d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement

Chapitre 3

Problématique et démarche de construction des indicateurs

I. Problématique

Conformément aux objectifs du « Plan Banane Durable », la durabilité des Systèmes de Culture innovants (SdCi) Banane-Brachiaria et Banane-Soja doit maintenant être évaluée par rapport au système de référence Banane-Jachère.

Compte tenu du temps imparti pour la réalisation de ce travail, seuls les volets agro-environnementaux et économiques de la durabilité ont été ici considérés. En effet, la durabilité agro-environnementale est le pré-requis nécessaire à la durabilité économique et sociale (**Van der Werf, 2002**) ; en sachant que la durabilité économique est souvent décisive dans la pertinence d'un système.

L'objectif de stage était donc de construire les indicateurs agro-environnementaux et économiques permettant d'évaluer la durabilité des SdCi.

Les utilisateurs de ces indicateurs seront les chercheurs, ingénieurs et techniciens du CIRAD et de l'Institut Technique Tropical (IT²) ; ils mobiliseront les sorties de ces indicateurs afin de discuter avec les producteurs des atouts et inconvénients des systèmes innovants proposés.

Ce travail s'inscrit dans un processus d'évaluation « a posteriori », c'est-à-dire suite à une mise en situation expérimentale sur la station CIRAD de Neufchâteau des SdCi. Cependant, compte tenu du calendrier du « Plan banane durable » et afin de pouvoir communiquer rapidement avec les producteurs - avant la fin du premier cycle de culture - des indicateurs de la durabilité économique « a priori » ont du être construits.

II. Démarche générale

Selon la méthode de **Mitchell (1995)**, la première étape du travail consiste à définir les objectifs à atteindre par les SdCi pour qu'ils puissent être qualifiés de durable ou non puis à déterminer quel(s) indicateur(s) caractérisera(ont) chacun des objectifs retenus ; la seconde étape est la construction proprement dite des indicateurs.

Ainsi, la deuxième partie du rapport présente les objectifs retenus puis les indicateurs choisis pour caractériser chacun de ces objectifs ainsi que leur construction ou leur adaptation au contexte de la production bananière en Guadeloupe. Pour plus de clarté, chacun des indicateur est présenté en fonction de l'objectif qu'il caractérise.

La construction des indicateurs a été réalisée en utilisant trois sources de données :
- des références bibliographiques ;

- des modèles ou le formalisme de modèles ;
- les résultats d'un essai non publié mis en place au cours de ce stage.

Ces résultats d'essais non publiés correspondent à un dispositif d'études mis en place au cours du stage permettant de comparer les SdCi au système de référence. Sur ce dispositif des séries de mesures ont été réalisées et ont permis d'adapter les indicateurs au contexte guadeloupéen. Afin de faciliter la lecture du rapport, la description de l'essai, le matériel et méthode et les résultats sont présentés en détails en **Annexe 2**.

Dans une troisième partie, les indicateurs construits ont été appliqués aux SdCi et au système de référence afin de discriminer le système le plus performant au regard des différents objectifs. Cependant cette étape n'est réalisée qu'à titre indicatif car les indicateurs n'ont pas été validés.



2^{ème} partie



**Construction des indicateurs
Agro-environnementaux et Economiques**



Dimensions de la durabilité	Echelles	
	Parcelle/exploitation	Territoire
Agro-environnemental	Maintien de la qualité des sols	Maintien de la qualité de l'eau
	Réduction des traitements herbicides	-
Economique	Maintien des revenus	-

Tableau 2 : Objectifs de durabilité des SdCi pour les dimensions agro-environnementale et économique

Chapitre 1

Les objectifs et les indicateurs à construire

Suivant la méthode proposée par **Mitchell (1995)**, les objectifs que doivent atteindre les SdCi au regard des contraintes majeurs de la production bananière en Guadeloupe ont du être déterminés. Le travail bibliographique sur le contexte de la production bananière dans la première partie a permis d'en identifier 4 : la diminution des traitements herbicides, le maintien de la qualité des sols et de la qualité de l'eau et le maintien du revenu des producteurs (**Tableau 2**).

Il a fallu ensuite définir les indicateurs qui permettront de caractériser l'atteinte ou non de chacun de ces 4 objectifs par les SdCi et de déterminer ainsi leur caractère durable ou non.

I. Premier objectif

Diminution des traitements herbicides

Un paramètre limitant du rendement et demandant un fort apport de produits phytosanitaires est la présence de bioagresseurs. On utilise le terme de bioagresseurs pour désigner l'ensemble des êtres vivants qui pénalisent la productivité, la qualité et la durabilité des cultures (**CIRAD**).

Un système de culture sera donc d'autant plus performant qu'il permettra une diminution de la pression adventice et parasitaire des cultures avec un minimum de traitements phytosanitaires et un minimum de main d'oeuvre. Deux approches sont donc possibles pour caractériser la pression adventice : un suivi de l'évolution de la couverture adventice ou un suivi des traitements nécessaires à la gestion de l'enherbement.

Un des objectifs de la plate forme système de culture étant de réduire la charge en herbicide afin de répondre au plan Ecophyto 2018, c'est un indicateur des traitements herbicides qui a été retenu pour caractériser la pression adventice sur les parcelles.

II. Objectifs 2 et 3

Maintien de la qualité des sols et de la qualité de l'eau

La qualité du sol concerne ici à la fois sa dimension fonctionnelle, c'est-à-dire son rôle dans le processus de production et son aptitude culturale (**Sébillote, 1982**) et sa capacité à résister aux dégradations.

Le potentiel de production d'un sol va dépendre de ses qualités physiques, chimiques, et biologiques qui sont les trois composantes de la fertilité. Deux options sont alors possibles : construire trois sous indicateurs pour évaluer chacune des composantes de la fertilité comme le propose **Tixier (2004)** où utiliser la macrofaune tellurique qui permet d'évaluer la qualité du sol et la durabilité des pratiques de gestion comme l'ont montré **Lavelle et Ruiz (2004)**. Compte tenu des travaux déjà réalisés sur la station sur la caractérisation de la macrofaune tellurique sous bananeraie, c'est cette dernière qui a été retenue pour caractériser la qualité des sols.

Objectifs	Indicateurs Agro-environnementaux et économiques						
	Rendement	Macro faune	Charge en herbicide	Sensibilité du sol à l'érosion hydrique	Capacité d'épuration des sols	Prix de vente de la banane	Coût de la main d'œuvre et des intrants
Agro-environnementaux							
Réduction des traitements herbicides			X				
Maintien de la qualité des sols		X		X			
Maintien de la qualité de l'eau				X	X		
Economiques							
Maintien des revenus	X					X	X

Tableau 3 : Matrice croisant les 4 objectifs de la durabilité poursuivis avec les indicateurs choisis pour les caractériser

Par ailleurs, les deux voies de dégradation principales des sols en bananeraie étant l'érosion hydrique et l'accumulation des polluants, la capacité des sols à résister aux dégradations liées à la production agricole sera caractérisée par la sensibilité du sol à l'érosion et par sa capacité à retenir et/ou à dégrader les polluants.

III. Objectif 4 Maintien du revenu des producteurs

Un système de culture est d'autant plus durable que les rendements sont élevés, que les produits sont vendus à un prix fort, que la dépendance aux subventions est minimale et que les coûts de production sont faibles. Un indicateur de rendement sera établi afin de pouvoir calculer les revenus des producteurs en fonction du prix de vente de la banane et des coûts de production.

Les indicateurs retenus pour caractériser chacun des objectifs des SdCi sont synthétisés dans le **tableau 3**.

Les chapitres suivants présentent la construction des six indicateurs retenus :

- un indicateur de la charge en herbicide ;
- un bio-indicateur de la qualité du sol ;
- un indicateur de sensibilité des sols à l'érosion hydrique ;
- un indicateur de capacité d'épuration des sols;
- un indicateur de rendement ;
- un indicateur économique de rentabilité.

Chapitre 2

Objectif de réduction des traitements herbicides

Un indicateur de la charge en herbicide

I. Les indicateurs de suivi des traitements herbicides

Il existe de nombreux indicateurs s'intéressant aux traitements herbicides et particulièrement à leurs effets sur l'environnement (**Hertwich, 1997**). Deux d'entre eux permettent de comptabiliser les doses appliquées sur les parcelles :

- la pression herbicide ;
- l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT).

La pression herbicide est calculée en quantité de substances actives par hectare et par an qui impactent directement sur les concentrations en produits phytosanitaires retrouvées dans les eaux. Elle est calculée comme suit :

$$(1) \quad \text{Pression herbicide} = \text{dose apportée} * \text{dose de substances actives (dans 1 litre ou 1 kg)}$$

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est un indicateur synthétique d'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires. L'IFT est calculé par parcelle et il correspond au nombre de doses homologuées utilisées par campagne et par ha. La campagne commence à la récolte du précédent.

La formule de calcul est la suivante :

$$(2) \quad \text{IFT} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Dose appliquée}}{\text{Dose homologuée}} * \frac{\text{Superficie traitée}}{\text{Superficie totale de la parcelle}} \right) \text{produit } i$$

Avec produit = herbicides et pesticides
Réf. : Chambre d'Agriculture du Gers, 2005

L'IFT est le plus précis puisque la quantité de matière active utilisée peut baisser du fait de l'homologation de nouvelles substances à faible grammage par hectare, sans pour autant diminuer la pression phytosanitaire. Par ailleurs, au niveau national, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est l'indicateur qui a été retenu par le gouvernement dans les Mesures Agro Environnementales (MAE) de réduction des produits phytosanitaires. Aussi, en France métropolitaine, il permet aux agriculteurs de situer leur pratique par rapport à des références régionales établies par les chambres d'agriculture.

Compte tenu de sa large utilisation au niveau national, il semble pertinent d'utiliser l'IFT dans le contexte de la production bananière guadeloupéenne.

Ainsi, la démarche a été s'approprier l'IFT puis de l'intégrer au contexte guadeloupéen. En effet, afin de déterminer si les Systèmes de Culture innovants (SdCi) à évaluer permettent une

diminution des traitements phytosanitaires, il convient de pouvoir les comparer à des références régionales qui reflètent les pratiques actuelles. Or cette référence n'existe pas pour la région Guadeloupe et il a fallu la déterminer.

II. La référence de traitement herbicide

Dans le cadre de ce travail, on ne s'intéresse qu'à la pression adventice et l'IFT calculé correspond à l'Indice de Fréquence de Traitement herbicide.

L'IFT de référence a été établi à l'aide d'un dispositif expérimental mis en place sur la station du CIRAD en Guadeloupe utilisant le système de référence Banane-Jachère. La description du dispositif expérimental mise en place est disponible en **annexe 2**.

En Guadeloupe, il n'existe pas de règle de décision régionale quant à l'application des traitements herbicides. Ainsi, il a fallu en déterminer une dans le cadre de cette étude. Un suivi régulier des parcelles expérimentales (**Annexe 2**) a permis de fixer à dire d'expert une décision de traitement à partir de 30% de recouvrement du sol par les adventices pour le système Banane-Jachère.

L'IFT de référence a été calculé pour une période allant de la destruction de la bananeraie précédente jusqu'à la récolte de premier cycle. Le calcul a été réalisé à partir de l'enregistrement des pratiques depuis la destruction du précédent jusqu'à 5 mois après la plantation, puis à partir de projections d'évolution du peuplement adventice pour la période allant de 5 mois jusqu'à la récolte (**Tableau 4**).

L'IFT de référence calculé est de :

9,8

Pour un travail plus complet, il aurait fallu enquêter un échantillon représentatif des producteurs sur leurs pratiques de traitement herbicide, établir leur IFT et définir des grilles de références en fonction du type d'exploitation; il est prévu que ce travail soit réalisé prochainement (**CNIS**).

III. Conclusion

Le calcul de l'IFT Herbicide du système de culture Banane-Jachère sur un cycle de culture, depuis la destruction du précédent jusqu'à la récolte, permet d'obtenir une référence à laquelle peuvent être confrontées les IFT Herbicides des SdCi et ainsi évaluer dans quelle mesure ils permettent une diminution des traitements.

Comme tout indicateur, l'IFT a ses limites : il ne tient pas compte des caractéristiques de chaque produit phytosanitaire (toxicité, solubilité, volatilité...), ni des caractéristiques du milieu sur lesquels sont appliqués les produits phytosanitaires. Cependant il est facilement calculable, précis, lisible et compréhensible à la fois pour les décideurs, les agriculteurs et le grand public.

<p>Ce travail n'est qu'une première approche qui a pour ambition de présenter l'IFT qui n'est jusqu'à présent pas utilisé en Guadeloupe ; il conviendrait d'établir une référence régionale en enquêtant les producteurs du croissant bananier ; ces références pourraient être établies par type d'exploitation (grandes exploitations de plaine mécanisable, petites exploitations d'altitude non mécanisable...) et par cycle de culture (cycle 1, 2, ...,5)</p>



Poste	Produit	Surface traitée	Dose appliquée sur la surface traitée*	Dose homologuée de référence**	IFT
Herbicide	Round up	3 x 460m ²	1,50L	2 - 3 L/ha	4,35
	Round up	3 x 460m ²	0,50L	2 - 3 L/ha	1,44
	Fusilade max	3 x 460m ²	0,07L	2 L/ha	0,27
	Basta F1	3 x 460m ²	0,56L	5L/ha	0,81
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
Somme					9,77

Tableau 4 : Calcul de l'IFT de référence à partir des données enregistrées (en noir) et des projections (gris).

* Dose appliquée : cf. Itinéraire Technique du système Banane-Jachère en **Annexe 3**.

** Dose homologuée de référence : cf. la liste des produits phytosanitaires homologués pour la banane en **Annexe 4**.

Chapitre 3

Objectif de préservation des sols et de l'eau

Partie A : Le vers de terre, un indicateur biotique de la qualité du sol

I. Les vers de terre comme bio-indicateur de la qualité des sols

Les organismes vivants du sol peuvent être utilisés comme bio-indicateurs révélateurs de la qualité des sols et de la durabilité des systèmes de culture. En effet, la macrofaune tellurique (>2mm) combine une action biologique (activation microbienne), à une action mécanique (bioturbation, construction de galeries et production d'agrégats organominéraux) et chimique (humification, minéralisation) (**Ruiz, 2004**). Ils contribuent par conséquent à la formation de la structure des sols, ils sont sensibles aux modifications de l'environnement physico-chimique du sol (**Lavelle et al., 2006**) et donc aux impacts des modes de gestion agricole (**Paoletti, 1999**).

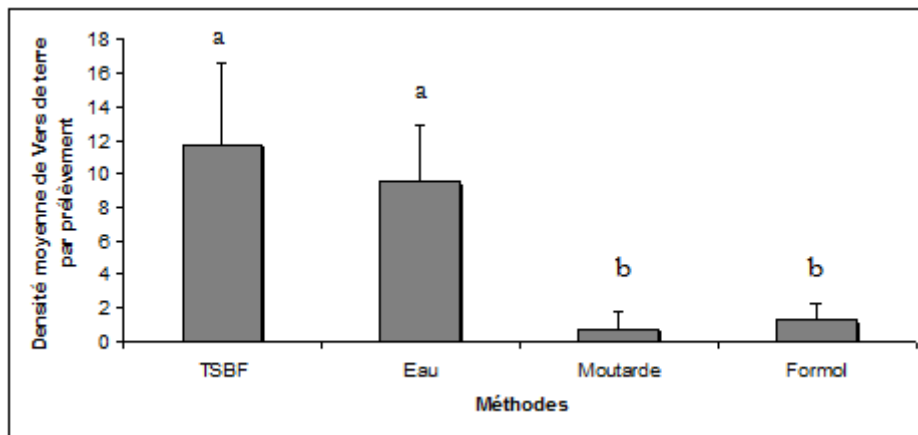
Ruiz (2004) a établi un « Indice biotique de la qualité du sol » qui permet d'évaluer la qualité du sol et la durabilité des pratiques de gestion. L'indice se calcule en fonction de l'abondance moyenne des taxons indicateurs présents dans les échantillons, choisis en fonction de leur sensibilité aux perturbations. A chaque taxon indicateur correspond un pouvoir indicateur. Cet indice est intéressant car il tient compte de la diversité biologique du sol. Cependant il est lourd à mettre en œuvre et demande un savoir expert pour l'identification des taxons ; par ailleurs les taxons indicateurs et leur pouvoir indicateur ont été déterminés en France métropolitaine et mériteraient d'être adaptés au climat tropical de la Guadeloupe. Il a donc été choisi de sélectionner un unique taxon indicateur qui permettrait d'évaluer de manière simple la qualité des sols.

Lavelle et al. (1997) distinguent trois groupes fonctionnels parmi la faune tellurique :

- les microprédateurs du réseau trophiques ;
- les décomposeurs de litières, groupe comprenant la mésofaune (80µm à 2mm), les arthropodes et les vers de terre épigés ;
- les ingénieurs du sol formés par les vers de terre anéciques et endogés ainsi que les termites et les fourmis.

Les ingénieurs du sol sont les organismes qui contrôlent directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour les autres organismes en affectant les propriétés physiques et chimiques du sol par la digestion et le brassage de la matière organique avec de la matière minérale (**Bossuyt et al., 2005 ; Pulleman et al., 2005**). De nombreuses études ont montré que parmi eux, les vers de terre représentent un indicateur pertinent de la qualité des sols et permettent d'évaluer la durabilité de systèmes de culture et de les comparer entre eux (**Paoletti, 1999**).

Figure 4 : Densité moyenne de vers de terre par prélèvement en fonction de la méthode d'échantillonnage.



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (tests statistiques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney).

Les vers de terre et plus spécifiquement l'abondance de la population lombricienne a été retenue comme bio-indicateur permettant de comparer la qualité des sols des SdCi au système de référence. Le travail a consisté en la mise au point d'une méthode de prélèvement qui permettent un échantillonnage représentatif et rapide à mettre en œuvre.

Ce travail a été réalisé par Claudrey Frenet, étudiant en Licence Professionnelle Agronomie-Agriculture et Développement Durable de l'université d'Amiens, en stage sur la station CIRAD de Neufchateau en juillet et aout 2010. Le résumé de son travail est présenté ci-après.

II. Mise au point de la méthode d'échantillonnage

La méthode classique d'échantillonnage est la méthode recommandée par le programme « Tropical Soil Biology and Fertility » (TSBF) (Anderson et Ingram, 1993) ; elle consiste à prélever un monolithe de terre de 30*30cm par tranche de 10cm en profondeur et d'effectuer un tri manuel.

L'objectif étant de trouver la technique la plus efficace possible, trois méthodes ont été comparées à cette méthode de base sur une parcelle en jachère :

- deux méthodes simples qui consistent à verser une solution irritante (Moutarde ou Formol 2%) sur le sol et à récupérer les vers de terre émergeant à la surface ; l'hypothèse de départ étant que ces méthodes permettent de supprimer le tri manuel ;
- une méthode combinée qui consiste à verser de l'eau chaude de manière à tuer les vers puis à trier manuellement pour les récupérer ; cette méthode permettrait d'améliorer l'exhaustivité de l'échantillonnage.

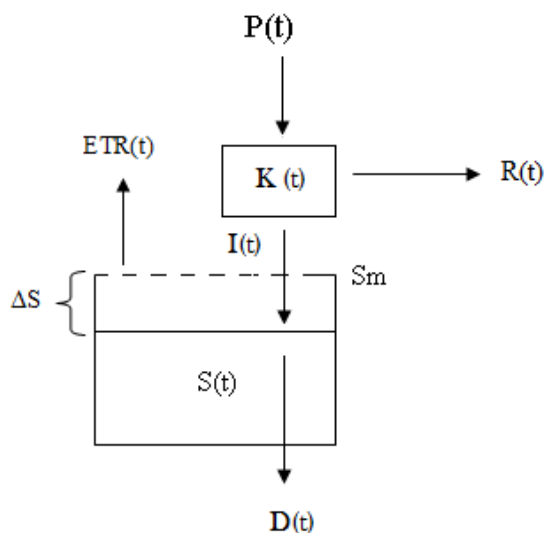
L'efficacité de l'échantillonnage a été mesurée en termes de densité de population lombricienne.

Les résultats obtenus sont présentés **Figure 4**. Pour la méthode TSBF et la méthode combinée, la moyenne des vers prélevés correspond à la strate 0-10cm ; quasiment aucun vers n'a été prélevé pour les strates plus profondes. La seule espèce présente dans les parcelles était *Pontoscolex corethrurus*, vers endogée particulièrement abondant en zone tropicale. Les méthodes simples au Formol ou à la moutarde sont inefficaces ; la méthode combinée n'a pas mis en évidence de différence significative de densité lombricienne par rapport à la méthode TSBF.

L'indicateur retenu permettant de caractériser la qualité des sols est l'abondance de la population lombricienne.

La méthode retenue pour son échantillonnage est la méthode TSBF avec le prélèvement d'une lame de sol de 10cm sur une surface de 30*30cm suivi d'un tri manuel ; il faut un minimum de trois prélèvements par parcelle.

Faute de références régionales, une quantité seuil de vers de terre permettant d'identifier un sol de bonne qualité n'a pas pu être établie. En l'état, cet indicateur doit être utilisé comme un outil de comparaison des sols ; il permet d'établir un classement relatif des sols.



$S(t)$: stock d'eau dans le sol au temps t
 S_m : capacité maximale de stockage en eau
 ΔS : variation du stock d'eau dans le sol
 $P(t)$: précipitations
 $K(t)$: capacité d'infiltration du sol
 $I(t)$: infiltration
 $R(t)$: ruissellement de surface
 $D(t)$: drainage
 $ETR(t)$: évapotranspiration réelle

Figure 5 : Modèle de génération du ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Diskin et Nazimov, 1995, modifié)

Partie B : L'indicateur de risque érosif

I. Le fonctionnement hydrique des sols

1. Modèle de fonctionnement hydrique des sols

L'érosion hydrique est un phénomène de pertes en terre qui se produit sous l'action de la pluie. Elle est liée à deux mécanismes qui sont le détachement des particules de terre déclenché par l'impact des gouttes de pluie sur les agrégats à la surface du sol et le transport des particules lié au ruissellement (Rishirumuhirwa, 1997). L'impact des gouttes de pluie peut entraîner la désagrégation de la structure à la surface des sols et être à l'origine de la formation en surface d'une pellicule de battance qui réduit la capacité d'infiltration du sol. Le ruissellement est un phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols qui prend naissance quand l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol (Roose, 1994).

Diskin et Nazimov (1995), proposent un modèle de fonctionnement hydrique des sols permettant de déterminer le ruissellement généré lors d'un événement pluvieux en fonction de la capacité d'infiltration du sol (Figure 5). Le sol est assimilé à un réservoir qui a une capacité d'infiltration (K) et un stock d'eau (S) qui varie en fonction de l'infiltration (I), de l'évapotranspiration (ETR) et du drainage (D).

Lors d'un événement pluvieux il y a aura de l'infiltration (I) ou du ruissellement (R) suivant que l'intensité de la pluie (P) soit inférieure ou supérieure à la capacité d'infiltration du sol (K) :

Si	$P(t) < K(t)$	alors	$I(t) = P(t)$	et	$R(t) = 0$
Si	$P(t) > K(t)$	alors	$I(t) = K(t)$	et	$R(t) = P(t) - K(t)$

2. Relation Ruissellement-Erosion-Couverture du sol

Le ruissellement généré sur les parcelles est à l'origine du transport de particules de terre ; ce phénomène est l'érosion hydrique proprement dite. Peu de travaux permettent de relier le ruissellement à l'érosion sur les sols de Guadeloupe où sont cultivées les bananes. Seul Khamsouk (2001), a établi une relation entre la lame ruisselée journalière (LR) et l'érosion (E), sur un Nitisol (sol volcanique) en Martinique, situé sur une pente assez forte ($p = 11\%$).

La relation établie sur sol nu est la suivante : $E \text{ (t.ha}^{-1}\text{)} = 0,6137 \text{ LR (mm)}$ avec $R^2 = 0,946$

Cette relation est peu satisfaisante puisqu'elle obtenue sur pente assez forte alors que les SdCi évalués sont des systèmes pouvant être mis en place en plaine mécanisable. Cependant cette relation est actuellement la seule disponible.

Il convient donc de s'intéresser aux facteurs qui contrôlent l'érosion et de faire un classement relatif du risque érosif en fonction de l'état de ces facteurs.

Les facteurs contrôlant l'érosion sont (Wischmeier, 1958) :

- l'érosivité des pluies qui traduit la capacité des averses à provoquer l'érosion ;
- l'érodibilité du sol qui est sa capacité à résister à l'énergie de la pluie ;
- le facteur topographique ;
- la couverture du sol.

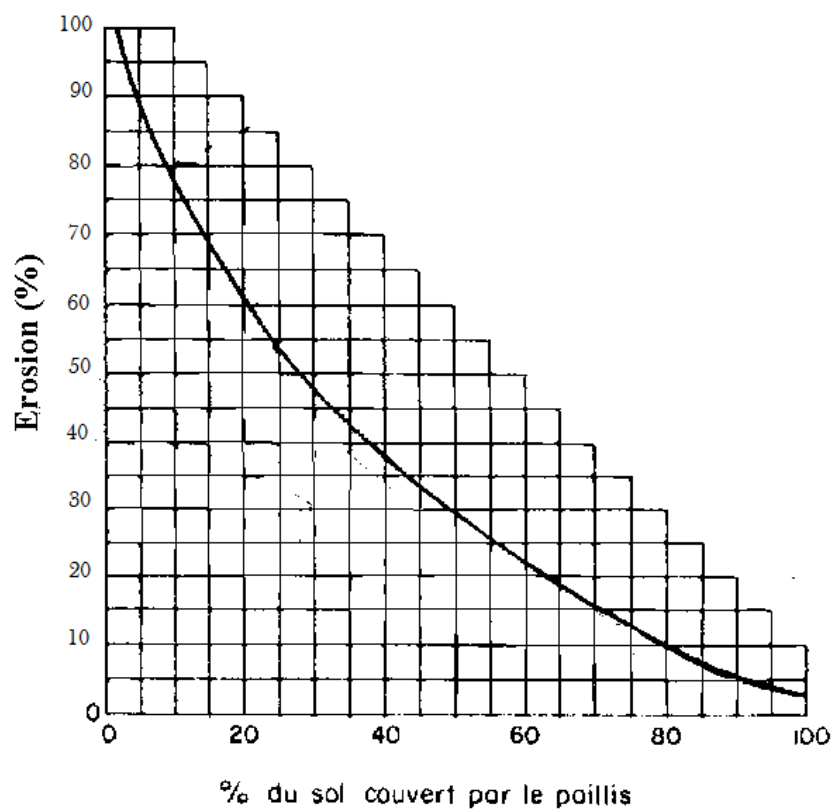


Figure 6 : Erosion en fonction du pourcentage de couverture de sol
(Wischmeier et Smith, 1978)

Remarque : Le pourcentage d'érosion correspond à l'indice culturale * 100. L'indice culturale est le rapport entre les pertes en terre d'une parcelle portant une culture donnée et celles mesurées sur une parcelle de référence maintenue en jachère nue.

Le facteur « couverture du sol » assuré par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui l'emporte sur celle de tous les autres facteurs qui conditionnent l'érosion (Wischmeier et Smith, 1978). En effet, quels que soient l'agressivité du climat, la pente et le type de sol, les phénomènes d'érosion seront médiocres si le sol est couvert à plus de 90 % (Roose, 1994). **Wischmeier et Smith (1978)** ont mis en évidence l'existence d'une relation exponentielle inverse entre le taux de couverture du sol par le paillis et l'indice culturale (rapport entre les pertes en terre d'une parcelle portant une culture donnée et celles mesurées sur une parcelle de référence maintenue en jachère nue) (**Figure 6**). On constate par exemple, que si un sol est couvert à 20%, l'érosion est réduite de 40%.

Pour construire l'indicateur de risque érosif, il faut dans un premier temps déterminer le taux de ruissellement en fonction de la capacité d'infiltration du sol puis dans un second temps, relier ce taux de ruissellement à un taux de pertes en terre. Le travail a consisté à adapter les variables d'entrées du modèle de **Diskin et Nazimov (1995)** aux données disponibles puis à établir une échelle de risque en fonction de la couverture du sol.

II. Adaptation du modèle de Diskin et Nazimov

Seule la connaissance de deux variables d'entrée est nécessaire au fonctionnement du modèle de ruissellement : la pluviométrie (P) et la capacité d'infiltration des sols (K).

La capacité d'infiltration est difficilement mesurable de manière dynamique ; en revanche la mesure de la capacité d'infiltration d'un sol à saturation (Ksat) est une mesure peu coûteuse et facilement accessible (**Annexe 2**).

Les sols sur lesquels s'est développée la culture de la banane sont des sols à forte teneur en eau, souvent proche de la capacité au champ (**Dorel, 2001**) pour lesquels il est acceptable d'approximer le ruissellement en utilisant le Ksat. Cette méthode de calcul va donc maximiser le ruissellement et le modèle devient alors :

$$\begin{array}{llll} \text{Si} & P(t) < K_{\text{sat}} & \text{alors} & I(t) = P(t) & \text{et} & R(t) = 0 \\ \text{Si} & P(t) > K_{\text{sat}} & \text{alors} & I(t) = K_{\text{sat}} & \text{et} & R(t) = P(t) - K_{\text{sat}} \end{array}$$

La mesure de la capacité d'infiltration d'un sol s'exprime en mm.min⁻¹, or les données pluviométriques régionales Météo France sont accessibles avec un pas de temps journalier ce qui ne permet pas de faire fonctionner le modèle. Il convient donc de trouver un modèle permettant de relier le ruissellement minute à la pluviométrie journalière en fonction du Ksat.

Sur la station CIRAD de Neufchâteau, les données pluviométriques sont accessibles avec un pas de temps à la minute et un pas de temps journalier. Il est donc possible, à partir d'un jeu de données pluviométriques, de faire fonctionner la modèle de ruissellement à la minute pour un Ksat donné, de faire la somme journalière de la quantité d'eau ruisselée et de la relier, par régression linéaire à la pluviométrie journalière. Ce travail a été réalisé avec les données pluviométriques de l'année 2009 pour des Ksat variant de 10 à 150 mm.min⁻¹. Un Ksat de 10 correspond à un sol fortement compacté du fait de passage répété d'engins lourds (**Cattan, communication personnelle**) ; au-delà d'une valeur de Ksat de 150 le ruissellement calculé est nul.

Figure 7 : Somme journalière de la quantité d'eau ruisselée calculée à partir des pluies à la minute, en fonction des pluies journalières...

Figure 7a : ... pour un Ksat de 10 mm.h⁻¹

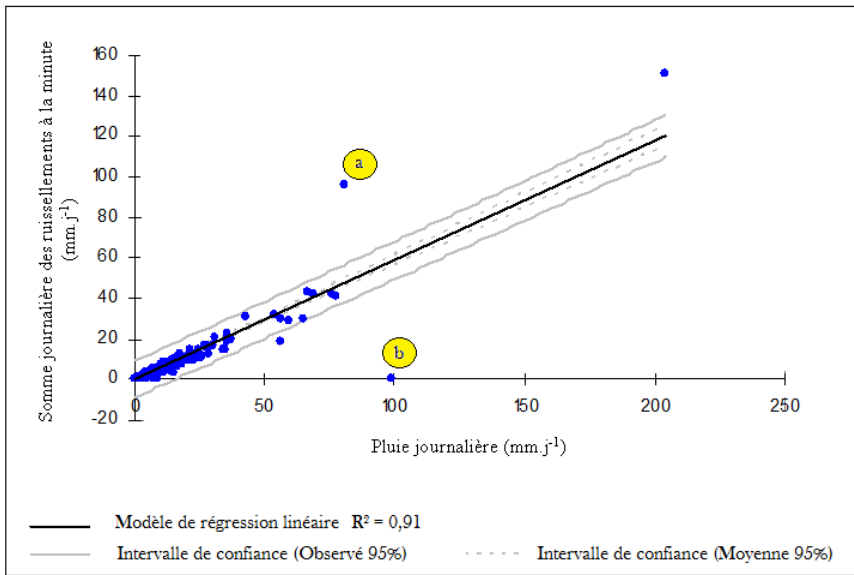


Figure 7b : ... pour un Ksat de 100 mm. h⁻¹

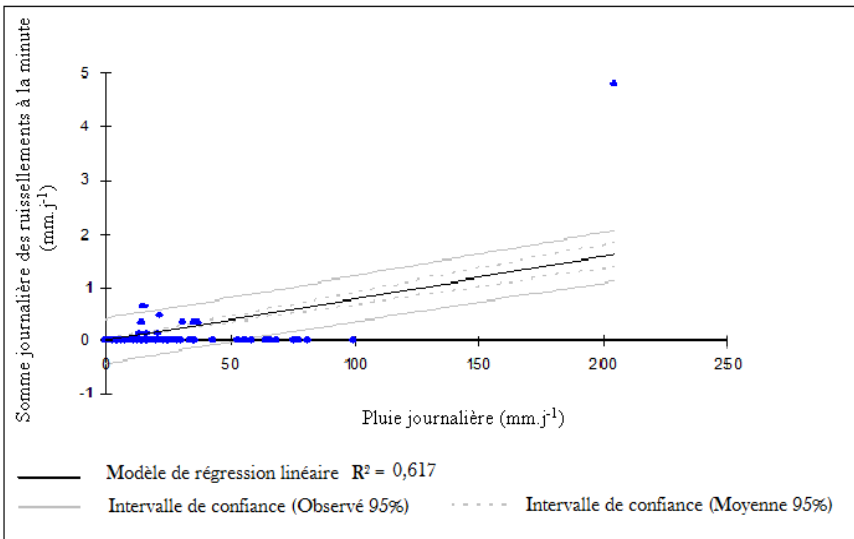


Tableau 5 : Modèles de régression linéaire obtenus pour des Ksat de 10 à 150 mm.h⁻¹

a : coefficient de régression ; *IC inf/sup* : intervalle de confiance inférieur/supérieur ; *R²* : coefficient de corrélation

	a	IC inf 95%	IC sup 95%	R ²
Ksat 10	0.588	0,564	0,613	0.91
Ksat 20	0.391	0,370	0,411	0.885
Ksat 30	0.259	0,243	0,275	0.852
Ksat 40	0.17	0,159	0,183	0.825
Ksat 50	0.112	0,658	0,772	0.798
Ksat 60	0.069	0,063	0,075	0.772
Ksat 70	0.043	0,039	0,047	0.738
Ksat 80	0.026	0,023	0,029	0.708
Ksat 90	0.015	0,013	0,017	0.668
Ksat 100	0.008	0,007	0,009	0.617
Ksat 110	0.004	0,004	0,005	0.615
Ksat 120	0.002	0,001	0,002	0.597
Ksat 130	0.001	0,001	0,001	0.605
Ksat 140	0.0002	0,000	0,000	0.605
Ksat 150	-	-	-	-

La **figure 7a** présente la régression linéaire obtenue pour un K_{sat} de $10\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Le coefficient de corrélation est fort ($R^2=0,91$) ce qui indique une bonne corrélation entre la somme journalière des ruissellements à la minute et la pluie journalière. Deux points sont cependant remarquables, les points a et b qui soulignent respectivement que pour une même pluie journalière le ruissellement peut être particulièrement important ou nul en fonction de l'intensité de la pluie à la minute. L'utilisation du modèle de régression linéaire pour évaluer le taux de ruissellement ne permet pas de prendre en compte ces cas exceptionnels.

Le **tableau 5** présente les coefficients de régression obtenus pour l'ensemble des K_{sat} utilisés et les R^2 associés à chaque modèle de régression linéaire. Pour un K_{sat} de 70, le coefficient de régression est de 0,043 ce qui est comparable à la valeur de 0,030 obtenue par **Cattan (2005)** par mesure directe ce qui permet de valider cette approche.

Cependant, on remarque que plus les K_{sat} augmentent, moins le coefficient de corrélation est important. Ceci s'explique par le fait que pour des K_{sat} important, il n'y aura du ruissellement que pour les pluies minutes particulièrement importantes (**figure 7b**). Plus le K_{sat} est important, plus le modèle de régression linéaire maximise le ruissellement.

III. Simplification de l'indicateur

1. Exemple de calcul de l'érosion hydrique

Le risque d'érosion hydrique est contrôlé par le ruissellement et par le taux de couverture du sol. Le ruissellement est lui-même contrôlé par la capacité d'infiltration des sols dont la valeur à saturation est facilement mesurable.

Le travail présenté ci-dessus permet, à partir de trois variables d'entrée que sont la pluie journalière, le K_{sat} et le taux de couverture du sol, d'estimer le taux d'érosion hydrique comme pour l'exemple qui suit.

Soit une pluviométrie journalière de 50mm sur un sol ayant une capacité d'infiltration maximale de $80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ et une couverture de sol de 20%.

- Le modèle de régression linéaire nous permet d'estimer le ruissellement (R) (cf **Tableau 5**) :

$$R = 0,026 * 50$$

$$R = 1,3 \text{ mm}$$

- L'équation de **Khamsouk (2001)** permet d'estimer l'érosion (E_0) sur un sol nu :

$$E_0 = 0,6137 * 1,3$$

$$E_0 = 0,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$$

- Le diagramme de **Wishmeier et Smith (1978)** indique que pour une couverture de 20%, l'érosion diminue de 40% ; l'érosion hydrique pour la parcelle considérée (E) sera donc :

$$E = 0,8 - (0,8 * (40/100))$$

$$E = 0,48 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$$

L'adaptation du modèle de Diskin et Nazimov, permet d'obtenir une valeur chiffrée de l'érosion sur une parcelle. Cependant il ne permet pas de discriminer facilement les différents systèmes de culture. L'ensemble du travail mené a permis de mettre en évidence que les deux facteurs contrôlant la sensibilité des sols à l'érosion hydrique sont le K_{sat} et le pourcentage de couverture du sol ; et d'établir pour quelles valeurs de K_{sat} il y avait un risque d'érosion. Ces deux facteurs peuvent donc être combinés pour construire un indicateur qui permette de comparer facilement les SdCi en termes de sensibilité à l'érosion.



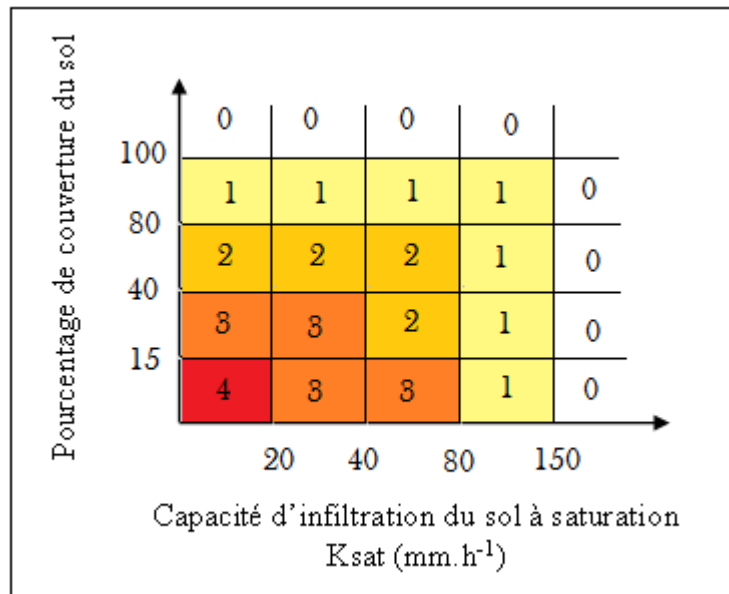


Figure 8 : Indicateur de sensibilité du sol à l'érosion

Echelle de sensibilité

- 0 Sensibilité nulle
- 1 Sensibilité très faible
- 2 Sensibilité faible
- 3 Sensibilité forte
- 4 Sensibilité très forte

2. L'Indicateur simplifié de risque érosif

Des classes de pourcentage de couverture du sol (0-15 ; 15-40 ; 40-80 ; 80-100) et de K_{sat} (0-20 ; 20-40 ; 40-80 ; 80-150) ont été retenues de manière à correspondre respectivement à une diminution régulière du pourcentage d'érosion (**Figure 6**) et du coefficient de régression du modèle de ruissellement (**Tableau 5**).

Ces deux facteurs sont ensuite croisés dans un tableau et une note de leur combinaison a été attribuée à dire d'experts, sur une échelle de 0 à 4 avec 0, sensibilité à l'érosion hydrique nulle et 4, très forte sensibilité (**Figure 8**).

Conclusion

La construction de l'indicateur de risque érosif a permis :

- de faire fonctionner un modèle de ruissellement à partir de données facilement accessible sur le terrain que sont le K_{sat} et la pluie journalière ;
- de souligner l'importance de la présence d'une plante de couverture dans la gestion du risque érosif.

Bien que l'indicateur construit ne retienne que le K_{sat} et le pourcentage de couverture de sol qui sont les deux facteurs fondamentaux contrôlant la sensibilité du sol à l'érosion, le travail global sur le modèle de **Diskin et Nazimov (1995)** a permis d'établir une relation entre le ruissellement potentiel et les pluies journalières en fonction des K_{sat} ; ces relations pourront être utilisées dans un travail ultérieur, dans la construction d'un modèle du fonctionnement hydrique des bananeraies par exemple (cf. Chapitre 3, SIMBA). Toutefois, ces relations ont été établies à partir de la pluviométrie enregistrées sur une année, pour les affiner, il conviendrait de faire ce travail avec la pluviométrie d'une décennie.

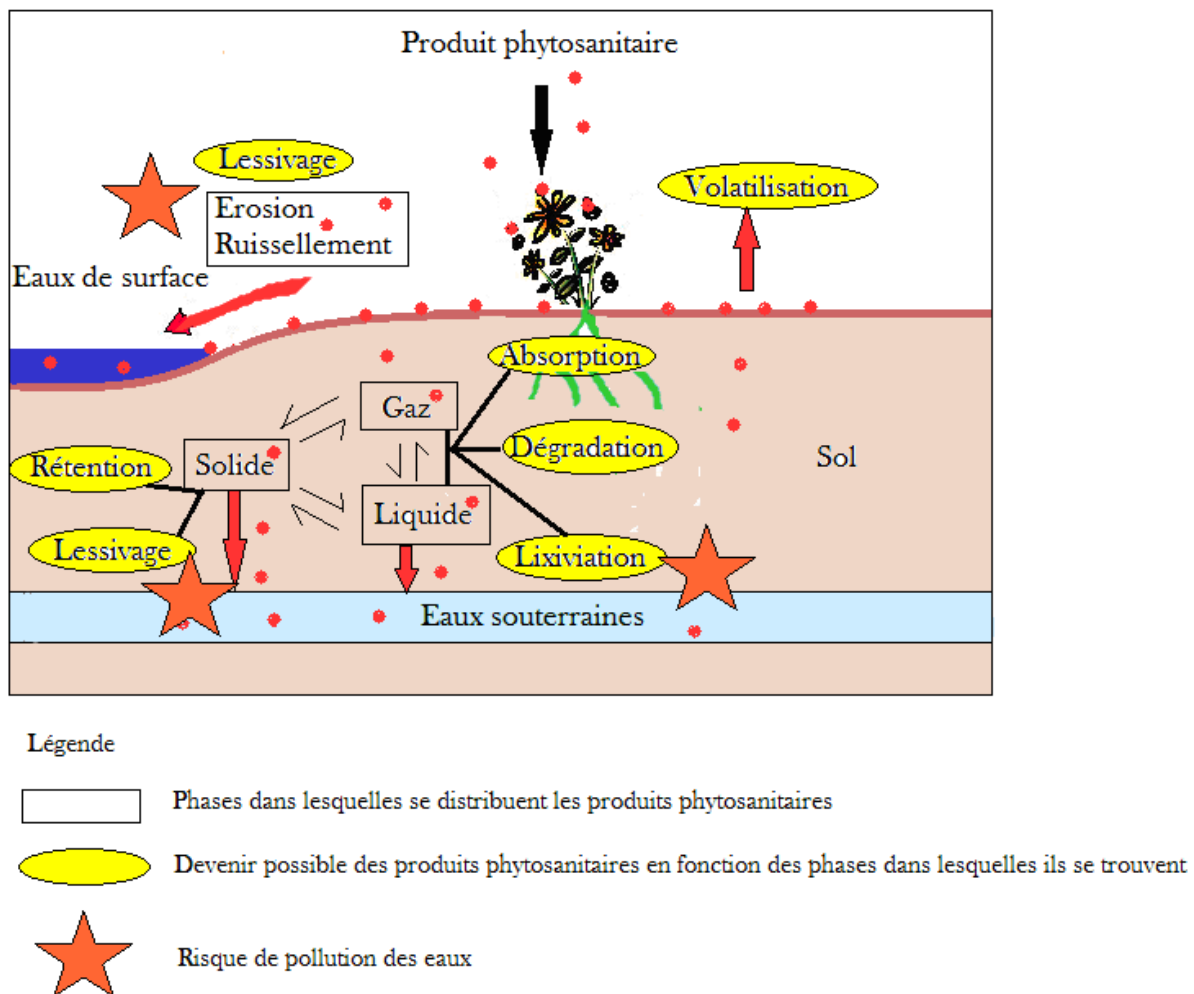


Figure 9 : Processus impliqués dans le devenir des produits phytosanitaires dans les sols, conditionnant leur disponibilité et par conséquent, leur efficacité phytosanitaire et la manifestation de leur caractère polluant (**Bariusso et al., 1994 ; modifié**)

Partie C : L'Indicateur de la capacité d'épuration des sols

I. Evolution des produits phytosanitaires dans les sols

Le caractère intensif de la culture de la banane se traduit par des apports de produits phytosanitaires visant à lutter contre les adventices, les parasites, les insectes et les champignons. Ils sont épandus soit au pied des bananiers sous forme de granulés ce qui entraîne un risque de pollution des eaux (cas des nématicides et insecticides), soit sous forme d'aérosols (cas des fongicides et herbicides) (Bassette, 2005). Les produits phytosanitaires appliqués au pied des bananiers sont les plus susceptibles d'être dissouts et transportés en profondeur dans les sols et les nappes phréatiques par infiltration ou par ruissellement (Bassette, 2005). Du fait du fort potentiel d'infiltration des sols sur lesquels se cultivent la banane (Dorel et al., 2000), le risque principal quant à la pollution des eaux réside essentiellement en le lessivage et la lixiviation des produits phytosanitaires.

A leur application, les produits phytosanitaires se distribuent dans les trois phases : solide, liquide et vapeur, selon des constantes d'équilibre d'adsorption, de désorption et de volatilisation caractéristiques de chaque produit mais qui varient en fonction des conditions pédoclimatiques (Barriuso, 1994). Pour la plupart des produits, les phénomènes responsables de la rétention du polluant dans la phase solide (adsorption, précipitation) régulent les autres phénomènes (absorption par les végétaux ou par la microflore du sol, précipitation, lixiviation, lessivage...) (Calvet et Barriuso, 1994). La part de polluant la plus mobile est celle localisée dans les phases liquide et vapeur et constitue la part du polluant disponible ; disponible pour être absorbée par les végétaux, disponible pour être dégradée par les micro-organismes du sol qui constituent la base du pouvoir épurateur du sol et disponible pour être entraînée en profondeur et être à l'origine de la contamination des eaux de drainage et des nappes (Barriuso, 1994). (Figure 9)

Le risque de pollution des sols par un produit phytosanitaire est fonction de sa persistance dans le sol et de sa mobilité qui dépend des phénomènes de rétention (Barriuso, 1994). La persistance et la rétention sont respectivement paramétrées par une durée de demi-vie et un coefficient de partage. La demi-vie est le temps nécessaire pour réduire de moitié une quantité initiale donnée de produits. Cette valeur est principalement déterminée par la dégradation, fonction de la température, de l'humidité et des micro-organismes du sol (Barriuso, 1994). Le coefficient de partage (K_d^*) caractérise la distribution du polluant entre la phase liquide et la phase solide. Parmi les caractéristiques du sol, la teneur en matière organique est la mieux corrélée au coefficient d'adsorption (Barriuso et Calvet, 1992).

La construction de l'indicateur de la capacité d'épuration des sols permettra d'évaluer l'influence du SdCi sur la capacité des sols à retenir et dégrader les produits phytosanitaires.

II. Les indicateurs existants

Il existe trois types de méthodes couramment utilisées pour évaluer l'impact des produits phytosanitaires sur les sols. Les méthodes simples (comparaison du nombre de pesticides ou des doses appliquées (e.g. IFT*)), les méthodes qualitatives (indice GUS*, indicateur I-Phy*) et les méthodes quantitatives (modèles numériques (e.g. PRZM*) et mesures in situ) (Mamy, 2008). Les méthodes simples reposent uniquement sur les techniques et ne tiennent pas

compte de l'environnement physique ; elles ne sont donc pas appropriées pour comparer le pouvoir épurateur des sols de différents systèmes de culture. Les méthodes qualitatives telles que les indices (GUS) ou les indicateurs (I-Phy) considèrent quelques variables de l'environnement et donnent accès à un classement relatif de l'impact potentiel des pesticides sur certains compartiments de l'environnement. Cependant, pour utiliser ces indices de manière pertinente, il est nécessaire de connaître les demi-vies des polluants pour les sols des parcelles étudiées ainsi que les coefficients de partage ce qui demande des techniques particulièrement lourdes à mettre en œuvre. Par ailleurs, il a été montré que l'indice I-Phy était peu discriminant quant à l'effet du sol (**Mamy, 2008**) ; il ne convient donc pas à la construction de notre indicateur. Les modèles permettent d'obtenir les meilleurs résultats quant au risque de pollution mais il est nécessaire de les paramétrer avec des données expérimentales des sites étudiés ce qui n'a pas été réalisé.

Kd : Coefficient de partage $Kd = (x/m)/C_e$ où (x/m) est la quantité de polluant adsorbée sur le sol ; C_e , la concentration du polluant dans la solution en équilibre avec la phase adsorbée.

Koc = $(Kd * 100) / (\% \text{Carbone organique})$

IFT (Indice de Fréquence de Traitement) : indicateur de la pression exercé sur le milieu basé sur les pratiques agricoles par type de culture

$$IFT = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Dose appliquée}}{\text{Dose homologuée}} * \frac{\text{Superficie traitée}}{\text{Superficie totale de la parcelle}} \right) \text{ produit } i$$

GUS (Groundwater Ubiquity Score) : indice empirique de lixiviation (**Gustafson, 1989**) permettant de classer les pesticides par rapport à leur aptitude à être transférés vers les eaux souterraines.

$$GUS = \log DT50 [4 - \log (Koc^*)]$$

En fonction de la valeur obtenue, les pesticides présentent un risque de contamination des nappes élevé ($GUS > 2.8$) ou un risque de contamination des nappes faible ($GUS < 1.8$).

I-Phy : l'indicateur I-Phy permet d'évaluer les impacts potentiels des produits phytosanitaires sur différents compartiments de l'environnement (**Boskstaller, 2004**). Il prend en compte certaines pratiques agricoles (mode d'application des herbicides, cultures...) et, contrairement à la majeure partie des indicateurs existants, il conduit à une estimation des impacts sur l'air, l'eau de surface et les eaux souterraines.

PRZM (Pesticide Root Zone Model) (**Carsel et al., 1998**) : modèle qui simule les mouvements et les transformations des pesticides dans les sols aux alentours de la zone racinaire des plantes. Il s'agit d'un des modèles utilisés dans le cadre de l'homologation des pesticides en Europe. Le critère le plus important pour le choix de PRZM est la prise en compte, avec une description homogène et équilibrée, de la plupart des processus impliqués dans le devenir des herbicides dans l'environnement (dégradation, sorption, volatilisation, lixiviation, ...).

III. Construction de l'indicateur

Compte tenu du devenir d'un polluant dans un sol et du fait que les différentes méthodes d'évaluation du risque de pollution des sols par les produits phytosanitaires soient inappropriées ou inutilisables au regard des données disponibles, il convient de construire un indicateur combinant les deux facteurs les plus accessibles qui contrôlent la rétention et la dégradation de la plupart des polluants dans un sol : la biomasse microbienne et la matière organique.

Les données disponibles ne permettent pas de construire un indicateur avec des données chiffrées ; il s'agit donc d'un indicateur relatif permettant de comparer des systèmes de culture entre eux en leur attribuant une note de 1 à 4 avec 1, sol limitant fortement la pollution des eaux et 4, sol limitant peu la pollution des eaux selon les capacités de dégradation et rétention suivante :

- 1 Forte rétention & Forte dégradation
- 2 Forte rétention & Faible dégradation
- 3 Faible rétention & Forte dégradation
- 4 Faible rétention & Faible dégradation

(Figure 10)

IV. Discussion - Conclusion

L'indicateur construit est particulièrement simple mais il est cohérent avec les mécanismes physico-chimiques qui régulent l'évolution des produits phytosanitaires dans les sols.

Il a été attribué une meilleure note à un sol ayant une forte capacité de rétention et une faible capacité de dégradation (2) qu'à un sol ayant une faible capacité de rétention et forte capacité de dégradation du polluant (3). En effet quand un polluant n'est pas retenu dans la phase solide il est disponible pour la dégradation par les micro-organismes mais également disponible pour être lixivié en cas de drainage important ce qui justifie ce choix. Cependant, s'il est avéré que la rétention d'un polluant dans le sol peut rendre difficile sa complète élimination (**Barriuso et al., 1996**) et augmente les occasions qu'il aura d'être soumis à des phénomènes de transferts pour aller contaminer les nappes (**Barriuso et al., 1996**).

Remarque : En cas de drainage ou de ruissellement important, un polluant sera d'autant plus susceptible de contaminer les eaux qu'il sera « disponible ». Il convient donc d'appliquer le polluant dans des périodes où le risque de lessivage et de lixiviation est minimale, c'est-à-dire lorsqu'il ne pleut pas ou suffisamment peu pour ne pas provoquer de ruissellement ou de drainage.

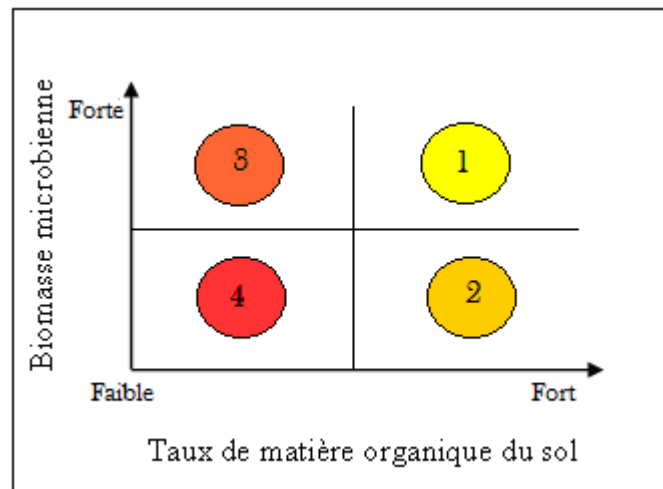


Figure 10 : Indicateur de la capacité des sols à limiter la pollution des eaux par un polluant

- 1 Forte rétention & Forte dégradation
- 2 Forte rétention & Faible dégradation
- 3 Faible rétention & Forte dégradation
- 4 Faible rétention & Faible dégradation

Chapitre 4

Objectif de maintien du revenu des producteurs

Partie A : L'Indicateur de Rendement

I. Les outils disponibles pour construire l'indicateur de rendement

1. Le modèle SIMBA

SIMBA (Tixier et al., 2008), est un modèle de simulation d'une bananeraie qui comprend des modules de simulations et des indicateurs permettant d'évaluer les performances agronomiques, économiques et environnementales des systèmes de culture bananiers (Annexe 5). Il a été calibré pour *Musa* spp., groupe AAA, cv. Cavendish Grande Naine avec des données de terrain acquises en Guadeloupe et en Martinique. Il existe différentes versions du modèle SIMBA ; celle retenue pour ce travail est SIMBA-N (Dorel et al., 2009) qui est la version la plus aboutie.

L'objectif est ici d'obtenir une estimation de rendement qui soit la plus précise possible afin de pouvoir communiquer avec les producteurs. Utiliser le modèle SIMBA, représentation mathématique simplifiée d'une bananeraie, permet de s'affranchir des mesures de terrain et de comparer différents systèmes de cultures rapidement, sans avoir à les mettre en place au champ. Cependant, il est fondamental que le modèle soit validé et paramétré pour la zone de culture étudiée.

Pour la mise au point de l'indicateur de rendement, on s'intéresse au module SIMBA GROW du modèle (Figure 11). C'est un module qui simule la croissance du bananier selon un formalisme classique, basé sur l'interception du rayonnement pour la production de biomasse et la répartition des assimilés entre les quatre compartiments que sont les feuilles (LAI), la biomasse végétative (BM VEG), la fleur (BM REG) et le rejet. Le développement du bananier est lui basé sur le concept de la somme des températures. Les paramètres d'entrées du modèle, le formalisme ainsi que l'ensemble des sorties sont présentés en Annexe 5.

SIMBA fonctionne avec un pas de temps journalier et seules deux variables d'entrée sont nécessaires pour obtenir une prévision de rendement en gramme de matière sèche (g MS) : le rayonnement global (Rg), et la température.

Cependant, SIMBA GROW n'a pas été calibré pour prendre en compte la présence d'une plante de couverture.

2. Les résultats d'essais

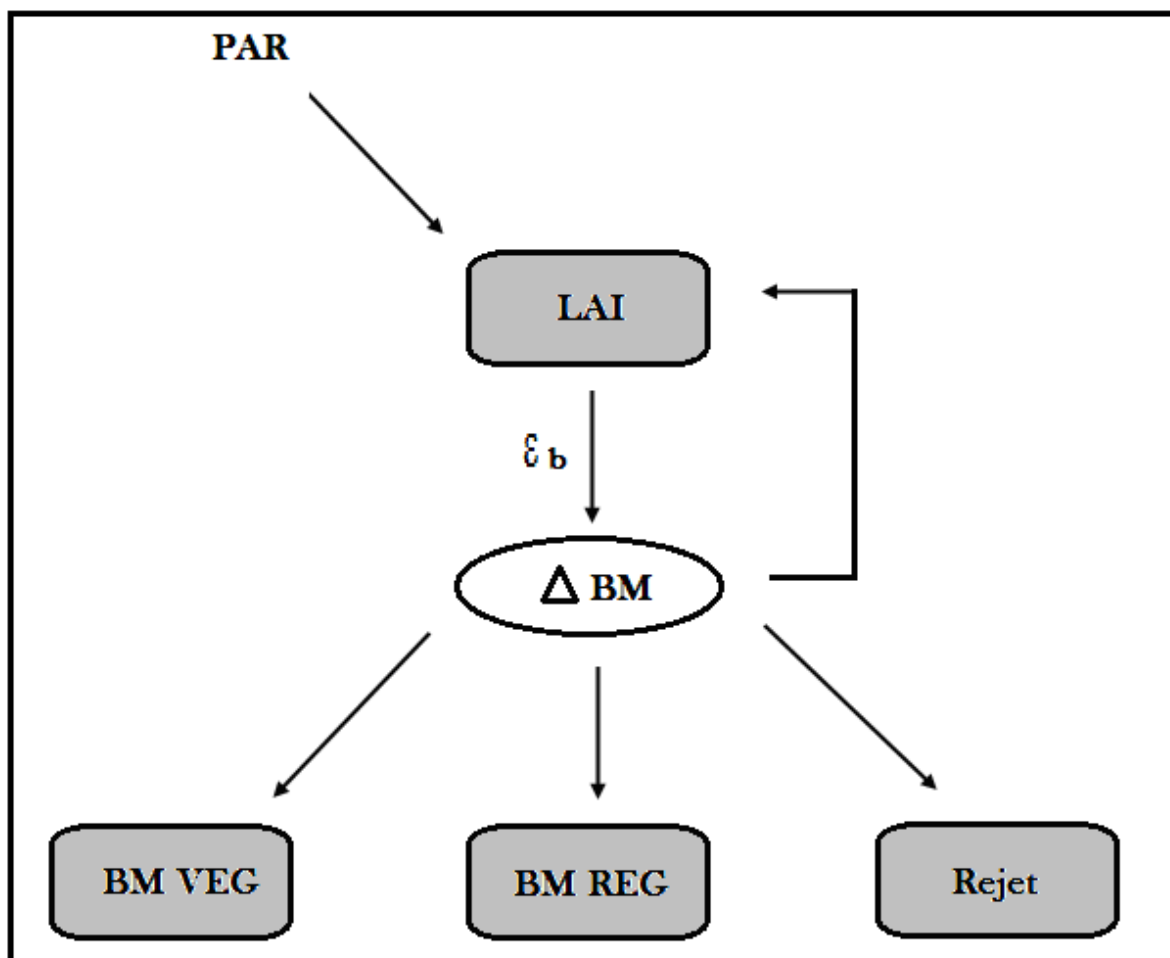


Figure 11 : Structure du module SIMBA GROW

Tableau 6 : Variables du module SIMBA GROW

PAR	Photosynthetically Active Radiation
LAI	Leaf Area Index
ϵ_b	Coefficient d'efficience de conversion de la photosynthèse
ΔBM	Assimilas
BM VEG	Biomasse végétative
BM REG	Biomasse reproductive
Rejet	

Damour et Dorel (communication personnelle, article en rédaction) ont réalisé un essai comparé Banane-Jachère / Banane-Soja sur lequel ils ont mis en évidence que la durée d'un cycle était en moyenne allongé de 4 semaines en présence du Soja et le nombre de doigts par régime plus important. Les mesures réalisées montrent que les parcelles ne diffèrent que légèrement en terme d'état hydrique (différence cependant non significative) et qu'elles sont semblables en terme de teneur en azote total ; en revanche la présence du Soja entraîne une diminution de la température de la parcelle de 10% par rapport à une parcelle en sol nu. C'est ce seul facteur température qui a été retenu dans leur essai pour expliquer l'allongement du cycle en présence de Soja.

Compte tenu de ces informations, l'hypothèse a été faite que la présence d'une plante de couverture pouvait être prise en compte par le modèle en ne faisant varier uniquement que le paramètre d'entrée « Température » d'un système de culture à l'autre. Ainsi, des thermomètres ont été installés sur le dispositif expérimental (**Annexe 2**) au niveau du sol et un mètre au dessus du sol avec pour objectif de déterminer dans quelle mesure la température variait d'un traitement à l'autre.

Pour obtenir un indicateur de rendement à partir de SIMBA, il a fallu déterminer comment modifier le paramètre d'entrée « Température » du modèle de manière en prendre en compte la présence de la plante de couverture.

II. Définition des paramètres d'entrées du modèle SIMBA : le rayonnement global et la température

Pour utiliser SIMBA-GROW, seules 2 variables d'entrée sont nécessaires :

- le rayonnement global R_g (MJ/m²/semaine) ;
- la température (°C/semaine).

1. Le rayonnement global

Le rayonnement global est une donnée disponible à pas de temps journalier sur les stations météo de MétéoFrance.

2. La température

a) Remarque préalable à l'exploitation des résultats

Pour des raisons de disponibilité de matériel, l'enregistrement des températures n'a été réalisé que sur une parcelle par traitement, sans répétition, ce qui n'a pas permis une exploitation statistique des relevés. Les résultats ci-après donnent des tendances et des pistes de travail mais n'ont pas de valeurs scientifiques.

b) Exploitation du relevé des températures

Le **tableau 7** présente la moyenne des températures enregistrées toutes les 20min pour chaque traitement du 18 juin 2010 au 19 août 2010. Les températures relevées à 1m au dessus du sol sont sensiblement les mêmes pour les trois traitements et sont environ supérieures de 5% à la température régionale relevée par MétéoFrance. En revanche, elles semblent être différentes au niveau du sol : la température la plus basse est enregistrée pour le traitement Banane-Soja et la



plus élevée pour le traitement Banane-Jachère. Par rapport au relevé MétéoFrance, l'augmentation est de 12% pour le traitement Banane-Jachère, 5% pour le traitement Banane-Brachiaria et 1% pour le traitement Banane-Soja.

III. Discussion - Conclusion

C'est le méristème terminal, au niveau de la tige souterraine du bananier, qui donne les feuilles avant de se transformer en bourgeon floral. La zone de croissance du bananier est donc bien située au niveau du sol et il semble raisonnable de faire l'hypothèse que ce sont les températures à ce niveau qui influencent la croissance du bananier. Cette hypothèse est appuyée par le fait que des températures différentes sont enregistrées au niveau du sol sur les différents traitements pour lesquelles les bananiers croissent différemment (**Annexe 2, figure X**). Par ailleurs, l'écart de température entre le traitement Banane-Jachère et Banane-Soja est de 11% ; il était de 10 % sur l'essai de **Damour et Dorel** ce qui permet de conforter le résultat obtenu malgré l'absence de répétition.

Ainsi, d'après l'essai, pour faire fonctionner SIMBA, il convient, d'augmenter de 12% les températures enregistrées par MétéoFrance pour le traitement Banane-Jachère, de 5% pour le traitement Banane-Brachiaria et de 1% pour le traitement Banane-Soja.

	Relevé un mètre au dessus du sol	Relevé au niveau du sol	Relevé MétéoFrance
Banane-Jachère	26,9°C	28,8°C	25,7°C
Banane-Soja	26,9°C	26°C	
Banane-Brachiaria	27,2°C	27,1°C	

Tableau 7 : Moyenne des températures enregistrées toutes les 20min pour chaque traitement du 18 juin 2010 au 19 août 2010

Partie B : La rentabilité des systèmes de culture

Un système de culture est d'autant plus rentable que les revenus qu'ils génèrent sont importants et que les coûts de production sont faibles. Un indicateur économique classiquement utilisé pour l'évaluation de la rentabilité des systèmes de culture est la marge nette. Il s'agit de la différence entre le produit brut et les coûts de production. Le produit brut est le revenu généré sur l'exploitation avant toute déduction de charges ou de taxes. Les coûts de production comprennent la rémunération du travail, les charges opérationnelles et les charges de mécanisation. Il est fondamental de prendre en compte la rémunération de la main d'œuvre dans l'évaluation de la rentabilité de systèmes bananiers puisqu'il pèse pour 40% en moyenne dans les coûts de production.

Le développement ci-après est une revue bibliographique qui permet de définir ces deux notions et de les calculer pour les systèmes de culture bananiers.

I. Le produit brut

Le produit brut (PB) répond à la définition suivante :

$$\text{PB} = \text{Rendement} * \text{Prix de vente} + \text{Aides à la production} + \text{Aides au développement rural}$$

1. Le prix de vente

La désynchronisation des bananiers au sein des parcelles entraîne une dispersion au cours de l'année des périodes de récolte ; le prix de vente de la banane variant de manière importante en fonction des saisons, il est nécessaire de pouvoir calculer le produit brut en fonction de la période de l'année. **Tixier et al. (2007)**, ont établi un graphique présentant le prix de vente mensuel moyen du kilogramme de bananes à l'importation pour la Martinique (**Figure 13**). Ce graphique est utilisable en l'état pour la région Guadeloupe.

2. Le rendement

L'utilisation du modèle SIMBA permet d'obtenir des prévisions de rendement.

3. Les aides

La filière banane antillaise à l'image des autres filières agricoles est concernée par deux types d'aides : d'une part, les aides à la production, dans le cadre de l'axe 1 de la PAC, qui sont traduites dans le POSEI, et d'autre part, les aides liées au développement rural, dans le cadre de l'axe 2, qui sont présentées dans le PDR. Ces deux documents sont déclinés au niveau guadeloupéen sous la forme du POSEIDOM, et du PDRG (**Annexe 6**).

II. Les coûts de production

Les coûts de production se répartissent en trois postes que sont la main d'œuvre, les charges opérationnelles et les charges de mécanisation. **De Barros et al. (2009)** ont détaillé l'ensemble de ces postes pour la filière banane antillaise. Cette liste (**Tableau 8**), permet d'enregistrer l'ensemble des investissements nécessaires à la production.

La marge nette se calcule en faisant la différence du Produit brut (avec ou sans les aides publiques) avec les Coûts de production.

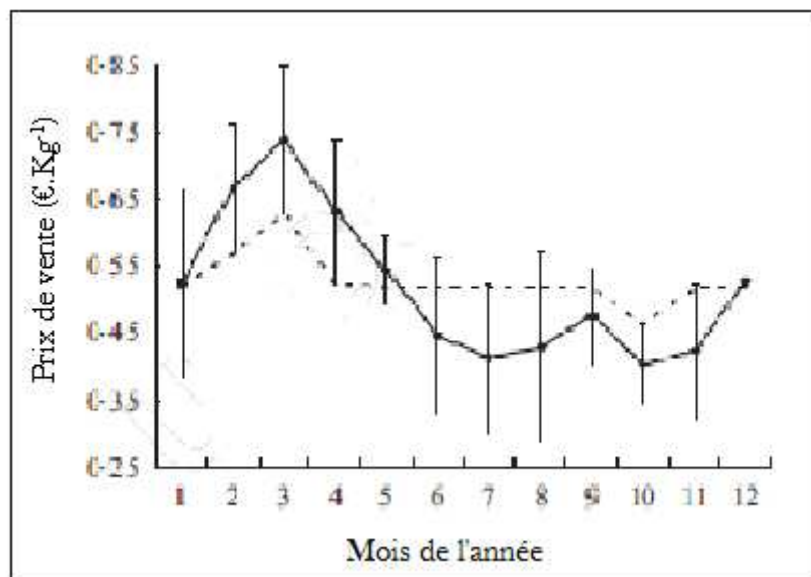


Figure 12 : Valeurs mensuelles moyennes et variation minimale du prix de vente de la banane à l'importation en Martinique sur la période 1999 à 2004 (SNM 2005 et ODM 2005 in Tixier et al., 2007, modifié)

Main d'œuvre	Charges opérationnelles	Charges de mécanisation
Permanente	Chaux	Carburant
Saisonniers	Engrais N, P, K	Machines
	Vitroplants	Camions
	Semences	Transport au port
	Herbicides	
	Fongicides	
	Insecticides	
	Analyses de laboratoire	
	Matériels divers	
	Fongicides post récolte	
	Cartons d'exportations	

Tableau 8 : Les postes d'investissement de la filière banane (De Barros et al., 2009, modifié)

Conclusion de la 2^{ème} partie

Cette partie présente la construction des indicateurs agro-environnementaux et économiques selon la méthode définie par **Mitchell (1995)**.

Les indicateurs construits doivent permettre d'évaluer les systèmes innovants en définissant s'ils répondent ou non aux objectifs de :

Réduction des traitements herbicides :	Indicateur IFT
Maintien de la qualité des sols :	Bio-indicateur de la qualité du sol Indicateur de risque érosif
Maintien de la qualité de l'eau :	Indicateur de la capacité d'épuration des sols
Maintien des revenus :	Indicateur de Rendement Marge nette (Produit brut et Coûts de production)

La construction de ces indicateurs a permis de faire émerger des pistes de travail intéressantes :

La définition d'une référence régionale pour l'IFT en Guadeloupe ;

La construction d'un modèle de ruissellement à partir de données facilement accessible ;

La prise en compte par le modèle **SIMBA GROW** de la présence d'une plante de couverture et d'un paillis.

Bien que les indicateurs n'aient pas été validés, ils ont, à titre indicatif, été mobilisés dans la troisième partie afin d'évaluer les SdCi créés.



3^{ème} partie



Evaluation des systèmes de culture innovants



Tableau 9 : Calcul de l'IFT Herbicide des SdCi à partir des données enregistrées
(cf. dates d'applications en Annexe 3)

Poste	Produit	Surface traitée	Dose appliquée sur la surface traitée*	Dose homologuée de référence**	IFT
Herbicide	Round up	3 x 460m ²	0,50L	2 - 3 L/ha	1,44
	Round up	3 x 460m ²	1,50L	2 - 3 L/ha	4,35
	Round up	3 x 460m ²	0,50L	2 - 3 L/ha	1,44
	Fusilade max	3 x 460m ²	0,07L	2L/ha	0,27
	Basta F1	3 x 460m ²	0,80L	5L/ha	1,16*
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
	Basta F1	3 x 460m ²	0,40L	5L/ha	0,58
Somme					10,98
Somme corrigée				10,98 - 0,16	10,82

9 a) Pour le traitement Banane-Brachiaria

** La quantité épandue pour ce traitement a été largement supérieure à ce qui aurait dû l'être du fait d'une erreur d'application ; il était convenu qu'un désherbage par tâches autour des bananiers soit réalisé ce qui n'a pas été le cas ; par ailleurs, la buse d'épandage utilisé avait un débit trop important par rapport au type de traitement réalisé. Il est raisonnable de ramener cette valeur à 1 pour le calcul de l'IFT Herbicide de ce SdCi.*

Poste	Produit	Surface traitée	Dose appliquée sur la surface traitée*	Dose homologuée de référence**	IFT
Herbicide	Round up	3 x 460m ²	1,50L	2 - 3 L/ha	1,44
	Fusilade max	3 x 460m ²	0,02L	2L/ha	0,08
Somme					1,52

9 b) Pour le traitement Banane-Soja

Avant propos

L'évaluation agro-environnementale des systèmes de culture innovants est réalisée « a posteriori », c'est-à-dire suite à une mise en situation expérimentale afin de permettre un premier jugement quant à la faisabilité et aux impacts agro-environnementaux des SdCi.

Cependant compte tenu la durée du stage et de la nécessité de devoir rapidement émettre un jugement sur ces SdCi vu le calendrier du plan banane durable, une évaluation qui combine à la fois des données de terrain et des projections d'évolution de la bananeraie pour un cycle de culture -de la plantation à la première récolte - est ici proposée.

Cependant, la phase de validation des indicateurs construits n'ayant pas été menée, ce travail n'est réalisé qu'à titre indicatif.

I. Le dispositif d'étude

Le dispositif d'étude utilisé pour l'évaluation est l'essai mis en place sur la station expérimentale du CIRAD. Présenté en **Annexe 2**, il permet d'évaluer les SdCi Banane-Soja et Banane-Brachiaria par rapport au système de référence Banane-Jachère. L'ensemble des résultats utilisés dans cette partie sont détaillés en **Annexe 2** et les itinéraires techniques de chaque système sont présentés en **Annexe 3**.

II. L'évaluation agro-environnementale

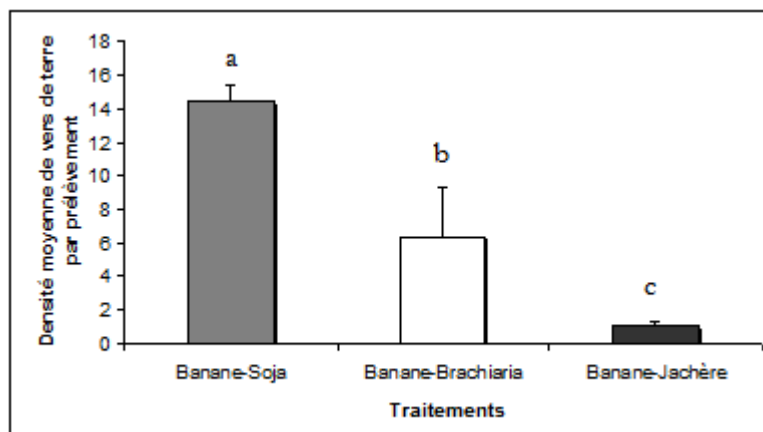
1. L'IFT Herbicide

Les calculs des IFT Herbicide des SdCi sont présentés dans les **tableaux 9a et 9b**. Comme pour le calcul de l'IFT Herbicide de référence, ils ont été calculés pour une période allant de la destruction de la bananeraie précédente jusqu'à la récolte de premier cycle. Le calcul a été réalisé à partir de l'enregistrement des pratiques depuis la destruction du précédent jusqu'à 5 mois après la plantation, puis à partir de projection d'évolution du peuplement adventice pour la période allant de 5 mois jusqu'à la récolte.

Les projections ont été établies grâce au suivi de la pression adventice réalisée sur le dispositif expérimentale et l'établissement des règles de décision suivantes. Sur le traitement Banane-Brachiaria les adventices se développent principalement au pied des bananiers et ont tendance à étouffer les bananiers pendant leur phase d'implantation ; le déclenchement des traitements a été porté à 10% de recouvrement adventice de la parcelle du fait de ce développement hétérogène des adventices. Pour le traitement Banane-Soja, la règle de décision a été de stopper tout développement de graminées pouvant concurrencer le Soja.

Ces projections portent respectivement à trois et à zéro le nombre de traitements pour les traitements Banane-Brachiaria et Banane-Soja d'ici la fin du premier cycle de culture.

Figure 13 : Densité moyenne de vers par prélèvement en fonction du traitement.



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (ANOVA et Tukey HSD).

	Banane-Brachiaria	Banane-Soja	Banane-Jachère
Ksat à la plantation (mm. h ⁻¹)	142.44	350	3280
Ksat huit mois après la plantation (mm. h ⁻¹)	347,55	350	132
Couverture du sol à la plantation	100%	100%	0%
Couverture du sol plantation huit mois après la plantation	80 à 100%	100%	Au maximum 30%*

Tableau 10 : Conductivité hydraulique et Couverture du sol à la plantation (mesurées) et huit mois plus tard (prédites)

* du fait de la décision de traiter à 30% de couverture adventice

Les IFT Herbicides des systèmes Banane-Brachiaria et Banane-Jachère sont respectivement de 10,82 et 1,52. Ils sont donc respectivement légèrement supérieur et largement inférieur à la référence de 9,77.

Du fait du passage herbicide avant le semis de Brachiaria et avant la plantation des bananiers (**Annexe 3**), la valeur de l'IFT Herbicide du traitement Banane-Brachiaria diffère peu du système de référence malgré un nombre inférieur de traitement après la plantation. Par ailleurs, des adventices se sont développées de manière importante sur le sol nu au pied des bananiers ; un détourage manuel s'est imposé afin de permettre aux bananiers de se développer sans risquer de ralentir leur croissance avec le passage d'un herbicide ce qui implique une charge de travail et un besoin en main d'œuvre importants.

D'autre part, il a été observé que le caractère volubile (qui s'enroule en hélice autour de son support) du Soja pérenne limitait la croissance du Bananier en étouffant les jeunes plants. Deux détourages manuels ont été nécessaires pour permettre au bananier de croître.

L'IFT herbicide de SdCi Banane-Brachiaria est sensiblement le même que celui du traitement de référence. Il apparaît donc que ce système de culture ne permet pas de réduire les traitements phytosanitaires en l'état. Veiller à recouvrir le sol nu de paillis autour des vitroplants après la plantation pourrait permettre de réduire les traitements.

L'IFT herbicide du SdCi Banane-Soja est inférieur à celui du système de référence. En revanche, il a nécessité un détourage manuel ce qui représente un poste de travail important. Pour le traitement Banane-Soja, deux solutions peuvent être envisagées pour limiter ce problème :

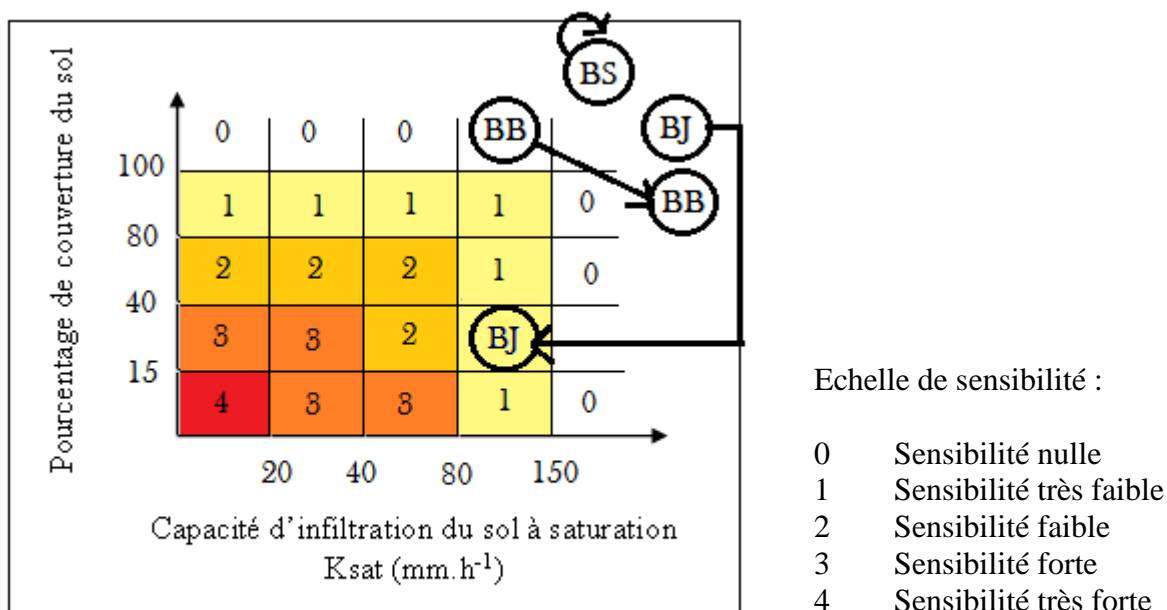
- réaliser un passage herbicide sur la ligne de plantation des bananiers avant la plantation ;
- passer un rouleau lisse sur la Soja avant de planter les bananiers ce qui permettrait de gérer son caractère volubile sans avoir recours aux herbicides.

2. La qualité des sols

La population lombricienne a été utilisée comme bio indicateur de la qualité des sols.

Les résultats obtenus sont présentés **Figure 13** et soulignent, du fait de l'abondance des vers, que les traitements Banane-Soja et Banane-Brachiaria génèrent des sols de meilleure qualité que le traitement Banane-Jachère. En effet, les vers de terre améliorent la structure du sol et favorisent l'activité microbienne du sol par la digestion et le brassage de la matière organique avec de la matière minérale (**Bossuyt et al., 2005 ; Pulleman et al., 2005**).

Ces différences peuvent s'expliquer par l'absence de travail du sol, la quantité et la qualité de litière présente sur les traitements Banane-Soja et Banane-Brachiaria. Par ailleurs, la différence observée entre les systèmes Banane-Brachiaria et Banane-Soja peut s'expliquer par la forte diminution des traitements herbicides sur ce dernier. En effet, **Springett et Gray. (2002)** et **Henning Krogh et al. (2007)** ont mis en évidence que les traitements herbicides pouvaient engendrer une diminution de la population lombricienne, particulièrement pour le Glyphosate (N-phosphonométhyl glycine) et le Basta® (Glufosinate-ammonium) ; ce dernier a été utilisé sur les parcelles pour gérer la flore adventice.



→ + 8 mois

Figure 14 : Evolution du risque érosif sur un cycle de culture pour les différents systèmes de culture

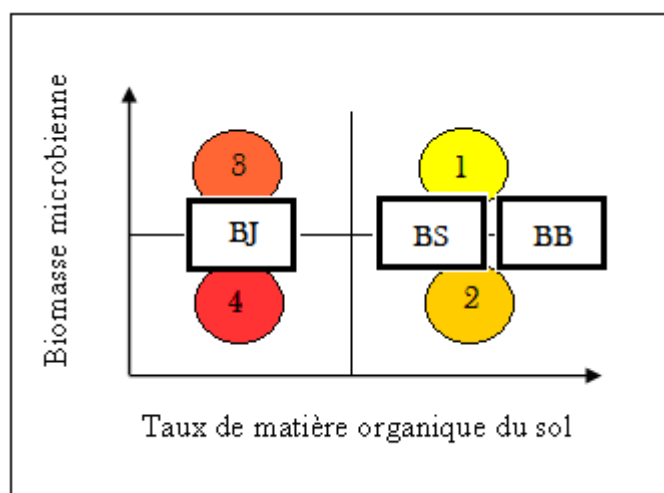


Figure 15 : Position relative de chacun des traitements dans le tableau Indicateur de la capacité d'épuration des sols.

- 1 Forte rétention & Forte dégradation
- 2 Forte rétention & Faible dégradation
- 3 Faible rétention & Forte dégradation
- 4 Faible rétention & Faible dégradation

BJ Banane-Jachère
 BB Banane-Brachiaria
 BS Banane-Soja

3. Le risque érosif

L'utilisation de l'indicateur de risque érosif nécessite deux variables d'entrée que sont le Ksat et le pourcentage de couverture du sol. Ces deux variables ont été mesurées à la plantation pour les trois systèmes de culture.

Afin d'établir l'évolution du risque érosif sur un cycle de culture, une projection a été réalisée à partir des travaux de **Dorel et al. (2010)**. Ils ont mesuré les Ksat à la plantation et huit mois plus tard sur une parcelle plantée après un travail du sol classique (CT) et sur une parcelle plantée directement sur un paillis de résidus de récolte - feuilles de bananiers - (NT) qui peuvent être assimilées respectivement aux traitements Banane-Jachère et Banane-Brachiaria. Ils ont mesuré une augmentation de Ksat d'environ 144% entre les deux relevés pour le traitement CT et une diminution de 96% pour le traitement NT ; ces valeurs ont été utilisées pour projeter l'évolution des Ksat sur les systèmes Banane-Jachère et Banane-Brachiaria ; l'évolution de la couverture du sol a été déterminée à l'aide d'experts (**Tableau 10**).

Pour le traitement Banane-Soja, la couverture étant vivante et permanente, on peut considérer que les deux variables ne varient pas au cours d'un cycle (**Tableau 10**).

L'évolution du risque érosif est schématisée **Figure 15**. Les deux SdCi présentent un risque nul permanent au cours du premier cycle alors que le système de référence atteint un risque de niveau 1 en fin de premier cycle. Les SdCi permettent d'améliorer la gestion du risque érosif.

Cependant, il est à noter que le paillis du système Banane-Brachiaria va progressivement être humifier puis minéraliser et donc ne plus couvrir le sol ; le système évoluera alors de la même manière que le système de référence Banane-Jachère. Au cours des cycles successifs l'indicateur se distribuera de manière hétérogène sur la parcelle avec des zones sensibles à l'érosion du fait de l'absence de couverture du sol et du passage répété d'engins et de travailleurs, et des zones peu sensibles à l'érosion du fait de la présence des résidus de récolte au sol (**Cattan et al., 2006**).

Pour le système Banane-Soja, le maintien permanent du Soja permet de maintenir un Ksat élevé du fait de l'activité racinaire du Soja ; reste à déterminer le moyen le plus efficace de gérer les résidus de récolte.

4. La capacité d'épuration des sols

En terme de taux de quantité de matière organique, les traitements ne diffèrent que pour l'horizon Ap1 où les parcelles Bananes-Soja et Banane-Brachiaria se distinguent. En revanche, ils sont statistiquement identiques pour les horizons Ap2 et Ap3 ainsi qu'en terme de biomasse microbienne (cf. **Annexe 2**).

La valeur de l'indicateur de la capacité d'épuration des sols de chacun des traitements est présentée **figure 16**. Elle correspond à l'état des sols au moment de la plantation, les données disponibles ne permettant pas de réaliser une projection sur un cycle de culture.

Du fait du taux de matière organique plus important dans l'horizon Ap1 des traitements Banane-Soja et Banane-Brachiaria, ces SdCi semblent générer des sols ayant une meilleure capacité d'épuration que le système de référence Banane-Jachère. Cependant, pour être plus pertinente ces données mériteraient d'être mesurées de manière régulière au cours d'un cycle ou plus de culture.

Traitements	Biomasse du régime (g MS)	Jours après plantation
Banane-Jachère	1676,09	196
Banane-Brachiaria	1852,48	226
Banane-Soja	2048,82	249

Tableau 11 : Sorties du modèle SIMBA GROW

III. L'évaluation économique

1. Le rendement

Le modèle SIMBA GROW a été utilisé avec un jeu de température et de rayonnement global enregistré sur une année jugée représentative. Le cycle a été initié en avril ce qui est le mois de plantation des bananeraies le plus fréquent.

Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau 11**. En présence d'une couverture du sol, la température diminue au niveau du méristème terminal par rapport à une culture sur sol nu ce qui entraîne un allongement des cycles. Dans l'hypothèse où la température est le seul facteur modifié par la présence d'une plante de couverture qui n'induirait pas de stress chez la plante cultivée, l'allongement des cycles entraîne une augmentation de l'accumulation d'énergie lumineuse et donc une augmentation de la production de biomasse.

Ainsi, les systèmes Banane-Brachiaria et Banane-Soja entraînerait une augmentation respective de 10,5% et de 22% du poids du régime par rapport au système de référence du fait de l'allongement du cycle. Ce résultat reste à valider notamment en travaillant sur les modifications de température induite par la présence d'une plante de couverture.

2. La marge nette

Faute de temps, ce travail n'a pas pu être mené à terme ; seules quelques remarques sont proposées ci-après.

a) Produit brut

De manière à faire des estimations du produit brut, il convient de tester différentes dates de plantations et de comparer les prix de ventes de la banane aux dates de récolte obtenues à l'aide de la courbe présentée en **figure 13** du rapport.

b) Coûts de production

L'évaluation des coûts de production se fait par l'enregistrement des opérations réalisées sur la parcelle. Ce qui distingue principalement chacun des systèmes est présenté ci-après :

En termes de charge de travail :

- les SdCi requièrent une phase de désherbage avant le semis de la plante de couverture mais ne demandent pas de travail du sol avant la plantation des bananiers ;
- le système Banane-Soja impose une ou plusieurs phases de détournement au moment de l'implantation des bananiers si le couvert n'est pas roulé au préalable ;
- le système Banane-Brachiaria requiert autant de passage d'herbicide que le système de référence avec en plus un détournement des bananiers.

En termes de charges opérationnelles (semences, engrais, traitements) :

- les SdCi impliquent une dépense pour les semences des plantes de couverture ;
- le système Banane-Soja permet une diminution importante de la dépense en herbicide.

Objectifs	Indicateurs	Valeurs		Interprétation
Agro-environnementaux				
Maintien de la qualité des sols	Qualité des sols (Bio-indicateur)	BJ	Vers peu nombreux	La qualité du sol est améliorée sous paillis ou couverture végétale vivante.
		BB	Vers assez nombreux	
		BS	Vers nombreux	
	Risque érosif (évolution sur un cycle)	BJ	De 0 à 1	Indicateur peu discriminant des systèmes de culture
		BB	0	
		BS	0	
Réduction des traitements herbicides	IFT	BJ	9,77	Le système Banane-Brachiaria n'atteint pas l'objectif de diminution des traitements
		BB	10,82	
		BS	1,52	
Maintien de la qualité de l'eau	Capacité d'épuration des sols	BJ	3/4	Une couverture du sol semble permettre d'améliorer les capacités d'épurations du sol.
		BB	1/2	
		BS	1/2	
Economiques				
Maintien des revenus	Rendement et récolte	BJ	1,7 Kg MS 196 DAP	Une couverture du sol entraîne un allongement de la durée du cycle à l'origine d'un développement plus important des régimes.
		BB	1,9 Kg MS 226 DAP	
		BS	2,0 Kg MS 249 DAP	
	Marge nette		-	-

Légende : BJ Banane-Jachère (Référence) ; BB Banane-Brachiaria ; BS Banane-Soja MS Matière Sèche ; DAP Day After Plantation (Jours après la plantation)

Tableau 12 : Bilan de l'évaluation des SdCi avec les indicateurs construits

Conclusion de la troisième partie

Dans cette troisième partie, les indicateurs construits ont été mobilisés afin d'émettre un premier jugement sur les SdCi sélectionnés. Le bilan de ce travail est présenté **Tableau 12**.

Il est à noter que les SdCi atteignent les objectifs de maintien de la qualité du sol et de l'eau. En revanche, si le système Banane-Soja permet une forte diminution des traitements herbicides, le système Banane-Brachiaria entraîne l'application d'une charge en herbicide plus importante que le système de référence.

En termes d'objectifs économiques, avec les données et le modèle actuellement disponible, il semble que les SdCi permettent d'augmenter les rendements du fait de l'allongement des cycles. La date de plantation des bananeraies serait alors à caler de manière à ce que la récolte se fasse lorsque le prix de vente de la banane est le plus élevé dans l'année (Février/Mars). Un travail supplémentaire est requis pour l'évaluation des coûts de production mais il semble que le système Banane-Soja soit le plus avantageux du fait de la diminution importante des traitements.

L'objectif majeur de la plate forme Système de culture du Plan Durable étant la réduction des traitements herbicides, c'est le système Banane-Soja qui semble le plus pertinent puisque c'est sur ce point qu'il se démarque du système Banane-Brachiaria avec lequel il est par ailleurs quasiment similaire sur le premier cycle de culture. En termes d'adoption par les producteurs, des solutions restent à apporter quant à la gestion de son caractère volubile durant la phase d'installation de la bananeraie.

Perspectives de travail

I. La validation des indicateurs

Avant de pouvoir être mobilisés afin de discriminer les SdCI, les indicateurs construits doivent être validés. Cette étape est primordiale pour améliorer les indicateurs et assurer leur crédibilité.

Bockstaller et Girardin (2003) proposent une méthodologie de validation des indicateurs en trois points qu'il conviendrait de mettre en œuvre pour les indicateurs construits :

- une *validation de la méthode* qui permette de justifier le bien fondé scientifique de l'indicateur ;
- une *validation des résultats* qui atteste de la robustesse des sorties des indicateurs ;
- une *validation par l'utilisation* qui démontre que l'indicateur construit est à la fois utile et utilisé comme outil d'aide à la décision.

Parmi les indicateurs retenus, l'IFT est un indicateur reconnu qui a été validé par l'utilisation ; l'indicateur de rendement utilise un modèle, la validation peut se faire par comparaison des sorties avec des données observées ou par comparaison avec d'autres modèles déjà validés (comme le modèle STICS qui a été partiellement paramétré pour la culture de banane aux Antilles) ou encore en soumettant à un panel d'experts les sorties du modèle et les données observées. Pour les autres indicateurs, il conviendrait de les soumettre à la critique d'experts (**Bockstaller et Girardin, 2003**).

La phase de validation des indicateurs est un travail long à mettre en œuvre ; elle n'a à ce titre pas pu être réalisée sur la durée du stage. Elle a cependant été amorcée pour le modèle SIMBA GROW. Le travail n'étant pas abouti, il ne figure pas dans le rapport mais est présenté en **Annexe 8**. Dans cette **Annexe 8**, figure une courte revue bibliographique, le travail de validation proprement dit et des propositions d'amélioration du modèle.

II. L'amélioration des Systèmes de Culture innovants proposés

La mise au point et le développement de systèmes de culture innovants et durables s'inscrivent dans une boucle de progrès de type « conception - évaluation 1 - expérimentation - évaluation 2 -amélioration ». Le travail réalisé au cours de ce stage a permis de réaliser une évaluation (évaluation 2) agronomique et économique partielle des systèmes de culture innovants Banane-Soja et Banane-Jachère. Des points faibles propres à chaque système ont pu être mis en évidence auxquels il convient de remédier afin de les améliorer.

Pour le système Banane-Brachiaria, il conviendrait de détruire le couvert de Brachiaria avec un rouleau à lame afin de diminuer la charge en herbicide. Par ailleurs, il est important de ne pas laisser de sol nu au pied des vitroplants une fois planté afin de ne pas favoriser le développement d'adventice dans cette zone.

Pour le système Banane-Soja, il apparaît nécessaire de passer un rouleau lisse sur la parcelle avant la plantation des bananiers afin de freiner le développement du Soja. Cette technique permettrait au bananier de ne pas être concurrencé par le soja pendant la phase d'implantation tout en maintenant le soja vivant.

III. La diffusion des Systèmes de Culture innovants auprès des producteurs

Il est primordial que la recherche intègre à ces processus de conceptions de systèmes innovants les producteurs eux-mêmes de manière à alimenter leur réflexion et à diffuser ces systèmes. Conformément aux axes III et IV du plan « Banane durable », l'IT² (Institut Technique Tropical) et le CIRAD travaillent auprès d'agriculteurs pionniers prêts à mettre en place les systèmes proposés. Ces producteurs doivent être accompagnés et conseillés afin de limiter les risques qu'ils prennent et leurs parcelles doivent être évaluées pour apprécier la validité des systèmes innovants sur une large zone pédoclimatique et d'en préciser les limites d'applications.

Conclusion générale

L'évaluation est une étape majeure du processus de conception et de diffusion d'un système de culture. Le travail réalisé au cours de ces 6 mois de stage contribue à la mise au point d'une méthode d'évaluation des systèmes de culture bananiers innovants en Guadeloupe par la construction d'indicateurs agro-environnementaux et économiques adaptés au contexte de production.

Dans un premier temps, les problèmes majeurs rencontrés dans la production bananière ont été mis en lumière afin d'en déduire les objectifs primordiaux à atteindre pour les systèmes de culture innovants mis au point par le CIRAD - Réduction des traitements herbicides ; Maintien de la qualité des sols ; Maintien de la qualité de l'eau ; Maintien du revenu des producteurs -.

Dans un second temps les indicateurs permettant de caractériser l'atteinte de chacun des objectifs ont été construits - Indice de fréquence de traitement ; Bio-indicateur de la qualité du sol ; Indicateur de risque érosif ; Indicateur de la capacité d'épuration des sols ; Indicateur de Rendement ; Marge nette -.

Dans une dernière partie, les indicateurs agro environnementaux construits ont été mobilisés afin de réaliser une première évaluation des systèmes de culture innovants. Le système Banane-Soja semble être le plus prometteur puisqu'il répond aux quatre objectifs à atteindre par les systèmes de culture bananier. Il faut toutefois rappeler que les indicateurs ont été mobilisés sans avoir été validés au préalable.

Les systèmes de culture bananiers innovants mis au point par le CIRAD sont basés sur l'association des bananiers avec une plante de couverture mise en place pendant la période de jachère et la suppression du travail du sol. Ceci constitue un premier pas vers la diversification de l'occupation des sols à la fois dans le temps et dans l'espace dans un contexte de culture intensive de la banane. Dans une optique d'intensification écologique de la production bananière et compte tenu du fait que 80% des denrées alimentaires sont importées en Guadeloupe (Obertan*, 2009) la réflexion pourrait être menée sur l'association des bananiers avec des cultures de diversification (tomate, melon, igname etc.). La récente mutation de l'Institut Technique de la Banane en Institut Technique Tropical (Institut technique intégrant à la fois la banane et les cultures de diversification) semble montrer la volonté des acteurs de la filière à travailler dans cette voie. Cependant, la diversification des cultures alimentaires dans la zone du croissant bananier se heurte à la présence de chlordécone dans les sols. La chlordécone est la substance active de deux insecticides, le Képone et le Curlone, utilisés de 1972 à 1993 en Martinique et en Guadeloupe pour lutter contre la larve du charançon des bananiers. Du fait de sa haute rémanence, elle est encore présente dans les sols et c'est par contact direct qu'elle contamine les légumes racines largement consommés en Guadeloupe (ignames, madères, patates douces). Un double objectif se dessine pour la filière banane en Guadeloupe : se diversifier tout en protégeant la population d'une exposition à la chlordécone.

* cf Bibliographie, Sites internet, Grain

Références bibliographiques



Références Bibliographiques

- AMATO M., LADD J.N. 1988. Essay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soils. *Soil biology and biochemistry*, 20, 107-114
- ANDERSON, J.M., INGRAM, J.S.I. 1993. *TSBF: A handbook of Methods*, second edition. Wallingford, CAB international.
- ANON. 2006. *Guidelines for soil description*. 4th Edition, FAO, Roma, Italy
- BARRIUSO E., CALVET R. 1992. Soil type and pesticide absorption. In : *Les pesticides et les polluants organiques des sols ; Transformations et dissipation*. Forum « Le sol un patrimoine menacé ? » Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G. Paris, 24 octobre 1996
- BARRIUSO E., CALVET R., SCHIAVON M., SOULAS G. 1996. *Les pesticides et les polluants organiques des sols ; Transformations et dissipation*. Forum « Le sol un patrimoine menacé ? » Paris, 24 octobre 1996
- BASSETTE C. 2005. *Modélisation 3-D de l'interception de la pluie par le bananier : effets des caractéristiques physiques du couvert sur les flux d'eau et d'énergie cinétique transmis au sol*. Thèse de Doctorat. 154p.
- BOCKSTALLER C., GIRARDIN P., VAN DER WERF H.M.G. 1997. Use of agroecological indicators for the evaluation of farmings systems. *European Journal of Agronomy*, 7, 261-270
- BOCKSTALLER C., GIRARDIN P. 2003. How to validate environmental indicators? *Agricultural Systems*, 76, 639-653
- BOCKSTALLER C. 2004. *Elaboration et utilisation des indicateurs. Exemple de I-Phy*. In : *Evaluer les risques environnementaux des pesticides Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate*. Mamy L. Barriuso E., Gabrielle B. 2008. *Innovations Agronomiques* 3, 121-143
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1982, Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle de l'agronomie. In : *Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe*. Tixier P. Thèse de doctorat, 2004
- BONHOMME R., GANRY J. 1976 - Mesure de l'indice foliaire du bananier par photographies hémisphériques faites *"in situ"*. *Fruits*, vol. 31, (7-8), 421-425
- BOSSUYT H., SIX J., HENDRIX P. 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology & Biochemistry* 37, 251-258.
- BURRIRO U.A., SAMOON H.A., OAD F.C., JAMRO G.H. 2002. Crop coefficient (Kc) and Water Use Efficiency (WUE) of Soybean as Affected by Soil Moisture Stress and Fertility Levels. *Pakistan Journal of Applied Sciences* 2(12) ; 1096-1098

- CALVET R., BARRIUSO E. 1994. Retention and bioavailability of pesticides in soil.
In : Les pesticides et les polluants organiques des sols ; Transformations et dissipation.
Forum « Le sol un patrimoine menacé ? » Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G.
Paris, 24 octobre 1996
- CARSEL R.F., IMHOFF J.C., HUMMEL P.R., CHEPLICK J.M., DONIGIAN A.S.JR., 1998. PRZM 3,
a model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil
zones: Users manual for release 3.12. In : Evaluer les risques environnementaux des
pesticides Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate. Many
L. Barriuso E., Gabrielle B. 2008. Innovations Agronomiques 3, 121-143
- CATTAN P., CABIDOUCHE Y. M., LACAS J. G., VOLTZ M. 2006. Effects of tillage and mulching
on runoff under banana (*Musa* spp.) on a tropical Andosol. Soil and Tillage Research 86,
38-51
- CELETTE F. 2007. Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté d'une vigne enherbée -
Application à un vignoble méditerranéen. Thèse de Doctorat SupAgro Montpellier, 182p
- CHAMPION J. 1963. Le bananier. Blume, Editions Maisonneuve et Larose, 263p
- COLMET-DAAGE F., LAGACHE P. 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de
roches volcaniques aux Antilles françaises. In : Conception assistée par modèle de
systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Tixier
P. Thèse de doctorat, 2004
- DAMAS O., LE BELLEC F., SOLVAR F., TOURNEBIZE R., OZIER LAFONTAINE H. 2007. La
production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. Intégration de la biodiversité
dans les systèmes de culture : résumés des interventions, Vieux-Habitants, 08 novembre
2007. Montpellier : CIRAD, Journée sur la Production Fruitière Intégrée en
Guadeloupe, 2007-11-08, Vieux-Habitants, Guadeloupe
- DE BARROS I., BLAZY J.-M., STACHETTI RODRIGUES G., TOURNEBIZE R., CINNA J.-P. 2009.
Emergy evaluation and economic performance of banana cropping systems in
Guadeloupe (French West Indies). Agriculture, Ecosystems and Environment 129, 437-
449
- DELVAUX B., HERBILLON A. J., VIELVOYE L. 1989. Characterization of a weathering sequence
of soils derived from volcanic ash in Cameroon. In : Conception assistée par modèle de
systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Tixier
P. Thèse de doctorat, 2004
- DEVILLERS J., FARRET R., GIRARDIN P., RIVIERE J.L., SOULAS, G., 2005. Indicateurs pour
évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides. Paris : Lavoisier. 278p.
- DISKIN M. H., NAZIMOV N. 1995. Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for
the infiltration process. Journal of hydrology 172, 313-330
- DOREL M., ROGER-ESTRADE J., MANICHON H., Delvaux B. 2000. Porosity and soil water
properties of Caribbean volcanic ash soils. Soil Use and Management, volume 16, 133-140

- DOREL M. 2001. Effets des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier. Thèse de Doctorat, CIRAD, 129p.
- DOREL M., ACHARDB R., TIXIER P. 2008. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European Journal of Agronomy* 29, 38-45
- DOREL M., LAKHIA S., PETETIN C., BOUAMER S., RISEDE J.-M. 2010. No-till banana planting on crop residue mulch : effect on soil quality and crop functioning. *Fruits*, vol. 65, 55-68
- GAIANA A., BALLE P., N'GUESSAN KANGAN A., DOMENACH A.M. 2002. Nitrogen fixation estimated by the ^{15}N natural abundance method in *Acacia mangium* Willd. Inoculated with *Bradyrhizobium* sp. and grown in silvicultural conditions. *Soil biology and biochemistry*. 34, 251-262
- GANRY J., CHILLET M. 2008. Methodology to forecast the harvest date of banana bunches. *Fruits*, vol. 63, 371-373
- GAUTRONNEAU Y. ET MANICHON H. 1987. Guide méthodologique du profil cultural, CEREF et GGEARA, 71p.
- GUSTAFSON D.I., 1989. Groundwater Ubiquity Score: a simple method for assessing pesticide leachability. In : Evaluer les risques environnementaux des pesticides Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate. Mamy L. Barriuso E., Gabrielle B. 2008. *Innovations Agronomiques* 3, 121-143
- HENNING KROGH P., GRIFFITHSB B., DEMSARC D., BOHANECC M., DEBELJAKC M., NEUMANN ANDERSEND M., SAUSSEE C., NICHOLAS E. BIRCHB A., CAULB S., HOLMSTRUPA M., HECKMANNA L.H., CORTETF J. 2007. Responses by earthworms to reduced tillage in herbicide tolerant maize and Bt maize cropping systems. *Pedobiologia* 51, 219-227
- HEUSCH B. 1971. Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Soc Sci Nat, Phys Maroc* ; 37 : 41-54
- HOLLANDER N.G., BASTIAANS L., KROPFF M.J. 2007. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. *European Journal of Agronomy*. 26. 92-103
- KHAMSOUK B., 2001. Influence des systèmes de cultures bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un solo brun rouille à halloysite en Martinique. Thèse de Doctorat.
- KHAMSOUK B., ROOSE E. 2003. Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures*, 12 : 3, 145-151
- LAVELLE, P., BIGNELL, D., LEPAGE, M., WOLTERS, V., ROGER, P., INESON, P., DHILLION, O.W. 1997. Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology* 33 (4), 159-193

- LAVELLE P., DECAËNS T., AUBERT M., BAROTA S., BLOUINA M., BUREAU F. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42, S3-S15
- LEBOURGEOIS F., PIEDALLU C., CLUZEAU C., NEDELTCHEVA T., BADEAU V. 2005. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. Convention de recherche. Colloque ECOFOR « Typologie des stations ».
- MALESSARD R. 1999. Pré-diagnostic de la filière de production banane en Guadeloupe. In : Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Tixier P. Thèse de doctorat, 2004
- MAMY L. BARRIUSO E., GABRIELLE B. 2008. Evaluer les risques environnementaux des pesticides Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate. *Innovations Agronomiques* 3, 121-143
- MAYER D.G., BUTLER D.G. 1993. Statistical validation. *Ecological Modelling* 68, 21-32.
- MITCHELL G., MAY A., McDONALD A., 1995. PICABEU: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2, 104-123.
- NOLOT J.-M., DEBAEKE P. 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. In : Systèmes de culture innovants et durables ; quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Reau R., Doré T. 2008. Educagri Editions, 175p
- NYOMBI K., VAN ASTEN P.J.A., LEFFELAAR P.A., CORBEELS M., KAIZZI C.K., GILLER K.E. 2009. Allometric growth relationships of East Africa highland bananas (*Musa AAA-EAHB*) cv. Kisansa and Mbwazirume. *Annals of Applied Biology*, Blackwell Publishing, Vol 155-3, p 403-418
- PAOLETTI M.G. 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74, 137-155
- PIERI C. 1989. Fertilité des terres de savane. Ministère de la coopération et CIRAD IRAT, Paris, 29 - 35
- PULLEMAN M., SIX J., UYLA A., MARINISSENA J., JONGMANS A. 2005. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Applied Soil Ecology* 29 , 1-15.
- REAU R., DORE T. 2008. Systèmes de culture innovants et durables ; quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri Editions, 175p
- RISHIRUMUHIRWA T. 1997. Rôle du bananier Dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les Hants plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro-Burundi). Thèse de Doctorat
- ROOSE E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO n°70*, Rome, 420p.

- RUIZ N. 2004. Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, 14 septembre 2004, Bondy : 327 p.
- SADOCK W., ANGEVIN F., BERGEZ J.E., BOCKSTALLER C., COLOMB B., GUICHARD L., REAU R., LANDE N., CCOQUIL X., MESSEAN A., BOHANEC M., DORE T. 2007. « Indicator-based MCDA framework for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. In : Systèmes de culture innovants et durables ; quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Reau R., Doré T. 2008. Educagri Editions, 175p
- SANTANA J.L., SUAREZ C.L., FERERES E. 1993. Evapotranspiration and crop coefficients in Banana. *ISHS Acta Horticultrae* 335: International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops
- SÉBILLOTE M. 1982. Fertilité du milieu et agriculture. *Bulletin technique d'information*, n°370-372, 327-599
- SIX J., BOSSUYT H., DEGRYZE S., & DENEK K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79, 7-31
- SPRINGETT J.A. & GRAY^a R.A.J. 1992. Effect of repeated low doses of biocides on the earthworm *Aporrectodea caliginosa* in laboratory culture. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 1739-1744
- TIXIER P., MALEZIEUX E., DOREL M. 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling* 180, 407-417
- TIXIER P. 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse de doctorat
- TIXIER P., DOREL M., MALÉZIEUX E. 2007. A Model-based Approach to maximise Gross Income by Selection of Banana Planting Date. *Biosystems Engineering*, 96 (4), 471-476
- TIXIER P., MALÉZIEUX E., DOREL M., BOCKSTALLER C., GIRARDIN P. 2007. Rpest—An indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution. Application to banana-based cropping systems. *European Journal of agronomy*, 26, 71-81
- TIXIER P., CHARBRIER C., MALEZIEUX E. 2007. Pesticide Residues in Heterogeneous Plant Populations, a Model-Based Approach Applied to Nematicides in Banana (*Musa* spp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 2504-2508
- TIXIER P., MALÉZIEUX E., DOREL M., WERY J. 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural Systems* 97,139-150
- TURNER D.W. 1994. Banana and plantain. In: *Environmental Physiology of Fruit Crop*, vol. 2. CRC Press, pp. 37-64

- VAN DER WERF H.M.G., PETIT J. 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 131-145
- VILAIN L. 2008. La méthode IDEA, indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. In : *Systèmes de culture innovants et durables ; quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Reau R., Doré T. 2008. Educagri Editions, 175p
- WISCHMEIER W. H. 1958. A rainfall erosivity index for universal soil loss equation. In : *Rôle du bananier Dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les Hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro-Burundi)*. Rishirumuhirwa T., Thèse de Doctorat, 1997
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. In : *Rôle du bananier Dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les Hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro-Burundi)*. Rishirumuhirwa T., Thèse de Doctorat, 1997

Cahiers et communiqués

Le plan banane durable, Dossier de Presse, ITBAN 2008

Ecophyto DOM, axe 6 du plan Ecophyto 2018, Ministère de l'agriculture et de la pêche

L'indice de fréquence de traitement : qu'est ce que c'est ? Action phytos, Gers Amont. Chambre d'agriculture du Gers, 2005

CNIS, Centre Nationale de l'Information Statistique

Commission Entreprises et stratégies de marché ; Réunion du 16 avril 2010

Articles de Presse

France-Antilles Guadeloupe, 04/03/2010

Les planteurs guadeloupéens font le deuil de leur production.

FXG (Agence de presse GHM)

Sites Internet

CIRAD - Maîtrise des bioagresseurs des cultures pérennes

<http://www.cirad.fr/nos-recherches/unites-de-recherche/maitrise-des-bioagresseurs-des-cultures-perennes>

Consultée le 27/04/2010

CNRS/sagascience-les bio-indicateurs du sol

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.php?pid=decouv_chapC_p5_d1&zoom_id=zoom_d1_7

Consultée le 15/04/2010

Ministère de l'agriculture et de la pêche

<http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>

Consultée le 11/06/2010

FAO - Land and Water development division Soybean

<http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/soybean.stm>

Consultée le 07/06/2010

Grain _La crise alimentaire en Guadeloupe

<http://www.grain.org/seedling/?id=636>

Consultée le 15/09/2010

FAO - Etc-Single crop coefficient (Kc)

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm>

Consultée le 07/06/2010

ODM (2005). Observatoire Des Marchés, Montpellier, France.

<http://passionfruit.cirad.fr/S>

Consultée le 14/12/2005

POSEI France

<http://www.posei-france.fr/index.php>

Consultée le 09/08/2010

Région Guadeloupe, site officiel - La filière agricole

http://www.cr-guadeloupe.fr/economie/?ARB_N_ID=700&ARB_N_S=702

Consultée le 15/04/2010

SNM (2005). Le Service des Nouvelles des Marchés, Paris, France.

<http://www.snm.agriculture.gouv.fr/S>

Consultée le 14/12/2005



Annexes



Sommaire des Annexes

Annexe 1	Présentation du CIRAD et de l'UPR 26 Système de culture bananes, plantains et ananas	87
Annexe 2	Dispositif expérimental	89
Annexe 3	Itinéraires techniques appliqués aux parcelles du dispositif expérimental	101
Annexe 4	Produits phytosanitaires homologués pour la banane	104
Annexe 5	Structure générale de SIMBA (<i>Tixier et al., 2008</i>) Paramètres d'entrées et formalisme de SIMBA GROW	106
Annexe 6	Les aides publiques de la filière banane	107
Annexe 7	Formulaire de calcul	108
Annexe 8	Validation du modèle SIMBA GROW	110

Annexe 1

Présentation du CIRAD et de l'UPR 26 Système de culture bananes, plantains et ananas

I. Le CIRAD

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

Le CIRAD est un centre de coopération en recherche agronomique spécialisé dans les productions tropicales et méditerranéennes. C'est un établissement public placé sous la double tutelle du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et du ministère des affaires étrangères européennes. Il emploie 1800 agents, coopère avec plus de 90 pays dans le monde et dispose de pôles scientifiques à vocation régionale dans l'outre mer français. Le budget s'élève à 203 millions d'euros dont les deux tiers proviennent de l'Etat français.

Les activités du CIRAD relèvent des sciences du vivant et de la terre, des sciences sociales et des sciences de l'ingénieur appliquées à l'agriculture, la forêt, l'élevage, l'alimentation, les ressources naturelles et les territoires ruraux.

Le CIRAD comprend trois départements scientifiques qui rassemblent l'ensemble de ses unités de recherche : Systèmes biologiques (Bios), Performance des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst), Environnements et sociétés (ES). Afin de concentrer ses moyens sur des questions critiques, le CIRAD a identifié six axes stratégiques prioritaires pour fédérer son effort de recherche :

1. Contribuer à inventer une agriculture écologiquement intensive pour nourrir la planète ;
2. Etudier les conditions d'émergence et les modalités de mise en valeur des bioénergies en faveur des populations du Sud ;
3. Innover pour une alimentation accessible, diversifiée et sûre ;
4. Anticiper et gérer les risques sanitaires infectieux liés aux animaux sauvages et domestiques ;
5. Accompagner les politiques publiques pour la réduction des inégalités structurelles et de la pauvreté ;
6. Mieux comprendre les relations entre l'agriculture et l'environnement et entre les sociétés humaines et la nature, pour gérer durablement les espaces ruraux.

II. L'UPR 26 Systèmes de culture bananes, plantains et ananas

L'UPR 26 a comme objectif l'étude systémique du fonctionnement de l'agroécosystème afin de proposer et évaluer de nouveaux systèmes de culture écologiquement intensifs. Les productions supports de ces travaux sont principalement le bananier, l'ananas. La banane plantain fait depuis peu l'objet d'études en raison de l'intérêt du modèle par comparaison avec la banane dessert : cette dernière est produite de façon intensive, la première est produite sur de petites parcelles en association avec d'autres plantes. L'approche privilégiée est pluridisciplinaire comme le montrent les intitulés des trois axes :

1. Dynamique des bioagresseurs et des communautés en conditions d'intensification écologique ;
2. Etats du milieu et fonctionnement de l'agrosystème en conditions d'intensification écologique ;
3. Conception et évaluation de systèmes de culture durables.

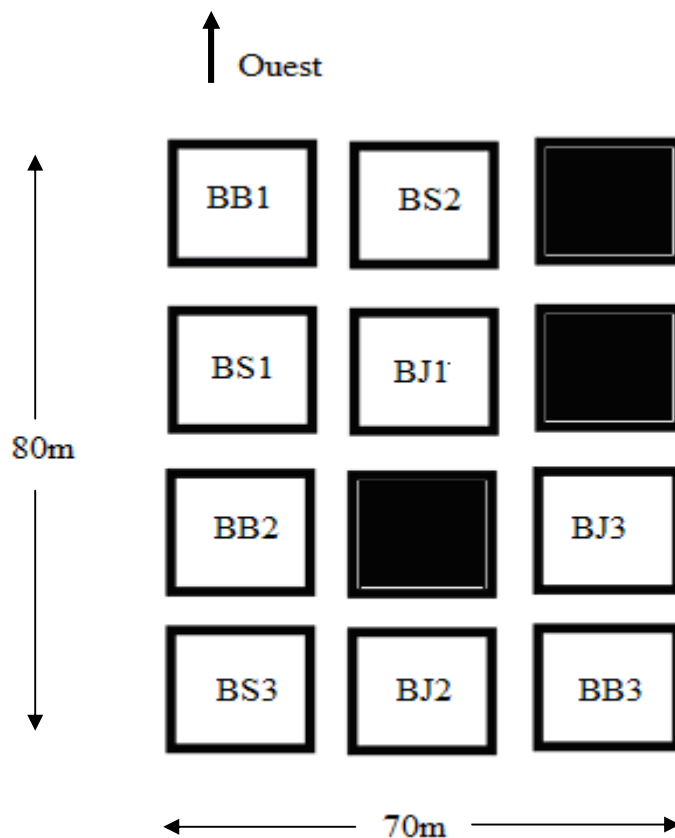


Figure 1 : Plan de l'essai
Trois traitements avec trois répétitions sur neuf parcelles élémentaires en randomisation totale ; surface d'une parcelle élémentaire : $20\text{m} \times 23\text{m} = 460\text{m}^2$
BJi : traitement Banane / Jachère, $i^{\text{ème}}$ répétition
BSi : traitement Banane / Soja, $i^{\text{ème}}$ répétition
BBi : traitement Banane / Brachiaria, $i^{\text{ème}}$ répétition

Annexe 2

Dispositif expérimental

I. Matériels et méthodes

1. Site expérimental

Le dispositif expérimental permettant de comparer les trois systèmes de culture a été mis en place sur la station CIRAD de Neufchâteau en Guadeloupe (61°W, 16°N ; alt. 250m). Les sols sont des sols volcaniques de types Andosols (classification FAO). La moyenne annuelle des précipitations est de 3500mm et la moyenne journalière des températures varie de 21 à 25°C.

Trois traitements ont été mis en place avec trois répétitions en randomisation totale sur neuf parcelles élémentaires de 460m² (n=3). Le précédent cultural était une parcelle de banane détruite par injection de glyphosate et un travail du sol par rotobèche a été effectué fin 2007.

Sur la durée du stage, les mesures ont été réalisées sur 4 mois, de mai à août 2010.

2. Plan de l'essai

Les trois traitements mis en place sont les suivants (**Figure 1**) :

- Banane / Jachère naturelle (BJ)

Après 28 mois de jachère naturelle, la couverture végétale a été détruite par application de Glyphosate le 3 avril 2010. Les bananiers ont été plantés sur sol nu travaillé à la rotobèche le 29 avril 2010.

- Banane / Soja pérenne (BS)

Après la destruction du précédent cultural, un passage de herse rotative a été effectué puis du Glyphosate a été pulvérisé sur les levées d'adventices le 16 janvier 2008. Le soja pérenne (Glycine cooper) a été semé le 17 janvier 2008 avec une densité de 40kg/ha. Les bananiers ont été plantés au trou sur couvert végétal vivant sans travail du sol le 29 avril 2010.

- Banane / Brachiaria (BB)

Après la destruction du précédent cultural, un passage de herse rotative a été effectué puis du Glyphosate a été pulvérisé sur les levées d'adventices le 16 janvier 2008. Le *Brachiaria decumbens* a été semé le 17 avec une densité de 10kg/ha. Les bananiers ont été plantés au trou sur paillis sans travail du sol le 29 avril 2010.

Pour les trois traitements, les vitroplants de la variété E902 ont été plantés avec un espacement de 2.35m x 2.35m.

3. Croissance des bananiers

Afin de suivre la croissance des bananiers, les travaux suivants ont été réalisés :

- une mesure mensuelle de la circonférence des bananiers à 10cm au dessus du sol sur 20 bananiers sélectionnés préalablement dans chaque parcelle élémentaire ;
- une mesure mensuelle de la nutrition azotée du bananier avec un chlorophylle-mètre (SPAD-Minolta) sur la feuille 2 de 10 bananiers choisis au hasard à chaque mesure ; le chlorophylle-mètre mesure le taux de chlorophylle de la feuille qui est corrélé à la teneur en azote de la feuille.

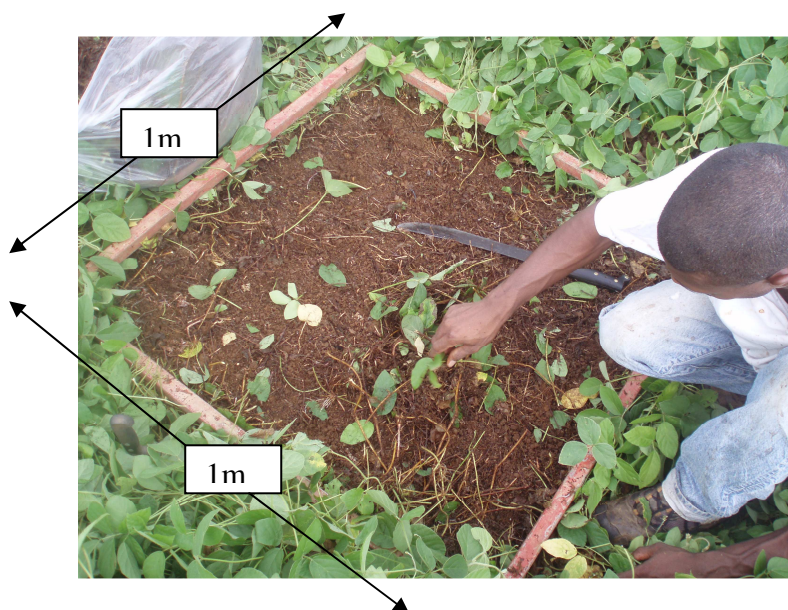


Photo 1 : Prélèvement de biomasse sur une parcelle élémentaire
(sur la photo : Steewy Lakhia)



Photo 2 : Fosse et grille permettant la description des sols sur une parcelle élémentaire



L'appareil est composé de deux anneaux concentriques (30 et 50cm) enfoncé dans le sol de quelques centimètres et alimentés par une citerne. L'anneau central sert à effectuer les mesures ; l'anneau externe permet de maintenir un niveau d'eau constant et équivalent à celui de l'anneau interne pour améliorer la verticalité de l'écoulement sous l'anneau interne. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps. Au bout d'un certain temps, un régime permanent s'installe et la vitesse d'infiltration devient constante.

Photo 3 : Infiltromètre à doubles anneaux

4. Qualité des sols

Deux semaines avant la préparation du sol pour la plantation des bananiers, la biomasse végétale a été mesurée sur chaque parcelle élémentaire sur 1m² déterminé au hasard (**Photo 1**).

A la plantation des bananiers, sur sol ressuyé, des fosses de 1m de profondeur ont été creusées sur chaque parcelle élémentaire. Une grille de 60cm x 100cm d'une maille de 10cm x 10cm a été appliquée verticalement sur le profil (**Photo 2**).

Les impacts racinaires du Soja et du *Brachiaria* ont été comptés sur chacune des mailles élémentaires.

Les unités morphologiques du profil ont été décrites (**Anon, 2006**) et la dureté a été mesurée dans chacune des mailles de la grille à l'aide d'un pénétromètre de poche.

En fonction des unités morphologiques, trois séries de quatre (absence d'horizon B) ou quatre séries de trois (présence d'horizon B) échantillons de terre ont été prélevés dans un cylindre de 100cm³ par profil : au sommet de l'horizon cultivé (Ap1), au centre (Ap2), au fond (Ap3) et au sein de l'horizon du sol non cultivé (B).

Ces échantillons ont été utilisés pour déterminer (i) l'indice des vides de l'horizon travaillé (Ap) en prenant une valeur de densité réel de sol de 2,41 pour les calculs, (ii) la teneur en eau (W), (iii) la biomasse microbienne par la méthode d'extraction fumigation (**Amato et Ladd, 1988**), (iv) la matière organique du sol (MOS) et (v) l'azote minéral,

Enfin, des mesures de conductivité hydraulique par saturation au double anneau ont réalisées 3 fois sur chaque parcelle élémentaire (infiltromètre Müntz) (**Photo 3**).

4. Pression adventice

Le suivi du recouvrement adventice et des traitements herbicides a été réalisé mensuellement sur 6*1m² sur chacune des parcelles élémentaire par prise de photographie et analyse d'image avec le logiciel ImageJ. Les parcelles Banane-Jachère ont été traitées à 30% de recouvrement adventice et les parcelles Banane-*Brachiaria* à 10% du fait du développement d'adventices étouffantes au pied des bananiers.

5. Pression des nématodes

Une analyse nématologique sur racine est prévue dans chaque parcelle élémentaire. Non réalisée sur la durée du stage.

6. Enregistrement de la température

Des thermomètres ont été installés au niveau du sol et un mètre au dessus du sol. Pour des raisons de disponibilité de matériel, l'enregistrement des températures n'a été réalisé que sur une parcelle par traitement, sans répétition, ce qui n'a pas permis une exploitation statistique des relevés. Les résultats ci-après donnent des tendances et des pistes de travail mais n'ont pas de valeurs scientifiques.

7. Suivi économique

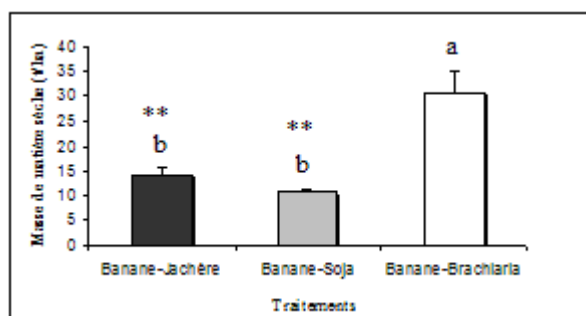
L'ensemble des opérations réalisées sur les parcelles ont été répertoriées ; elles sont présentées en **Annexe 3**.

8. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 2.10.1

L'homogénéité des variances a tout d'abord été testée par le test de Lévène. Si ce dernier confirmait l'homogénéité des variances, les données étaient traitées par ANOVA puis par le test post hoc Tukey HSD. Si le test de Levene rejetait l'homogénéité des variances, les valeurs logarithmiques des données étaient testées. Si le test de Levene ne confirmait toujours pas l'homogénéité des variances, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis était utilisé suivi du test post hoc de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Figure 2 : Masse de matière végétale sèche sur les parcelles avant la plantation de la bananeraie (Moyennes)



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (ANOVA et test de Tukey HSD) ; (** $p < 0,01$)

	Relevé un mètre au dessus du sol	Relevé au niveau du sol	Relevé MétéoFrance
Banane-Jachère	26,9°C	28,8°C	25,7°C
Banane-Soja	26,9°C	26°C	
Banane-Brachiaria	27,2°C	27,1°C	

Tableau 1 : Moyenne des températures enregistrées toutes les 20min pour chaque traitement du 18 juin 2010 au 19 août 2010

II . Résultats

1. Les plantes de couvertures

a) Biomasse végétale à la plantation (**Figure 2**)

	Relevé un mètre au dessus du sol	Relevé au niveau du sol	Relevé MétéoFrance
Banane-Jachère	26,9°C	28,8°C	25,7°C
Banane-Soja	26,9°C	26°C	
Banane-Brachiaria	27,2°C	27,1°C	

La biomasse végétale du *Brachiaria* est significativement supérieure à celle du Soja et de la végétation spontanée qui s'est développée sur la jachère naturelle.

b) Distribution racinaire du *Brachiaria* et du Soja

La réalisation des cartes d'impacts racinaires associée à l'analyse statistique met en évidence que la colonisation racinaire diminue avec la profondeur quelque soit le traitement (**Figures 3 et 4**).

Le système racinaire fasciculé du *Brachiaria* colonise de manière abondante et homogène le sol jusqu'à 40 ou 50cm de profondeur (en fonction de l'absence ou non d'horizon B).

Le nombre d'impacts racinaires du Soja est inférieur à celui du *Brachiaria* quelque soit la profondeur. Les impacts racinaires du Soja en profondeur sont ceux des racines profondes en pivot, ceux en surface, relativement plus nombreux, sont ceux des racines nodales superficielles qui proviennent des tiges rampantes en contact avec le sol.

Le *Brachiaria* a une forte production de biomasse et ses racines se développent en profondeur. Il assure un rôle « pompe biologique » par lequel il génère un recyclage de la biomasse et des nutriments.

Remarque :

Diamètre moyen des racines principales du bananier : 0,50 à 0,60cm (avec des extrêmes de 0,20 à 1cm)

*Diamètre moyen des racines de *Brachiaria decumbens* : 0,03cm*

c) Température des parcelles

Le **tableau 1** présente la moyenne des températures enregistrées toutes les 20min pour chaque traitement du 18 juin 2010 au 19 août 2010. Les températures relevées à 1m au dessus du sol sont sensiblement les mêmes pour les trois traitements et sont environ supérieures de 5% à la température régionale relevée par MétéoFrance. En revanche, elles semblent être différentes au niveau du sol : la température la plus basse est enregistrée pour le traitement Banane-Soja et la plus élevée pour le traitement Banane-Jachère. Par rapport au relevé MétéoFrance, l'augmentation est de 12% pour le traitement Banane-Jachère, 5% pour le traitement Banane-*Brachiaria* et 1% pour le traitement Banane-Soja.

2. La qualité des sols

a) Description des profils (**Figure 5**)

Les profils de sol observés sous paillis mort de *Brachiaria* montrent sous le mulch une couche de 5 à 10 cm d'épaisseur de terre fine, fragmentaire, de couleur brun noir au contact du paillis,

Figure 3 : Cartes des impacts racinaires du *Brachiaria* et du Soja.
Sur chaque carte est figurée la moyenne du nombre d'impacts racinaires par dm^2 .

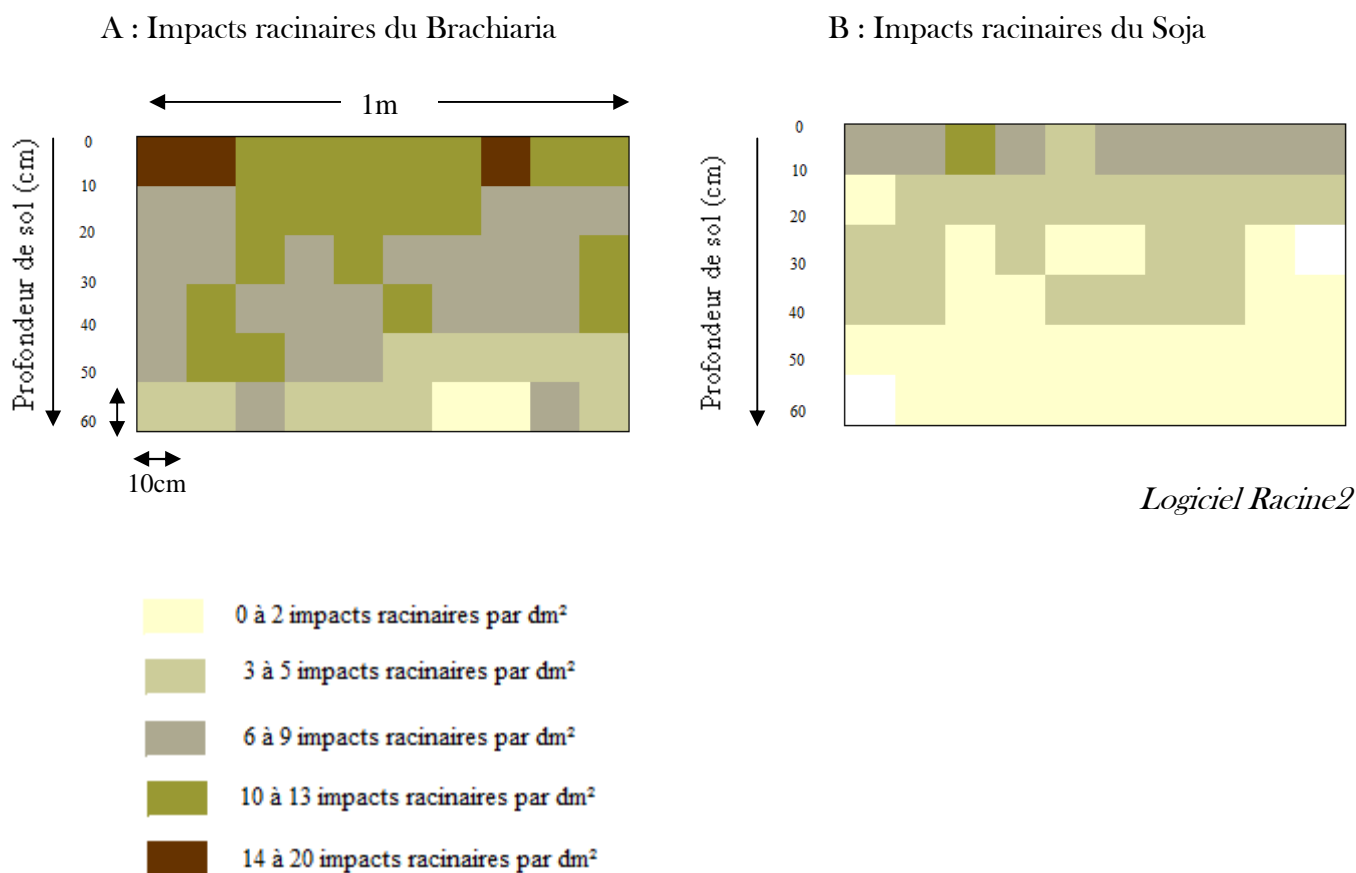
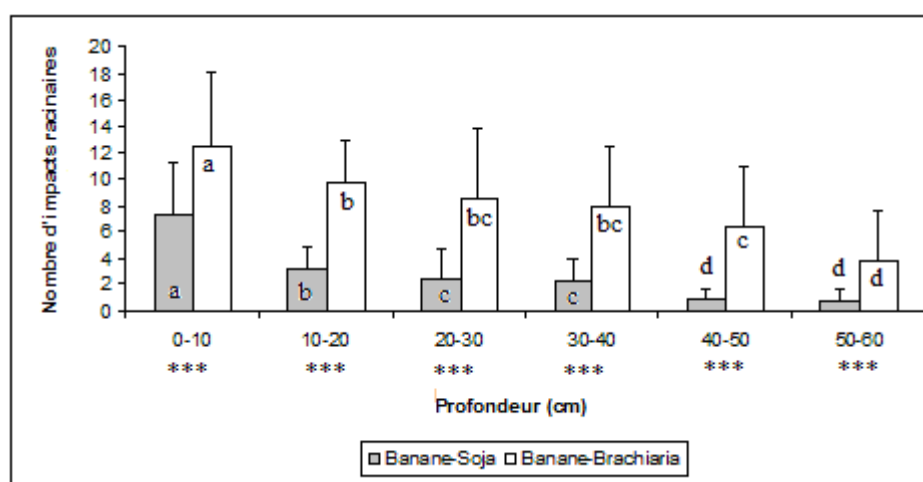


Figure 4 : Nombre d'impacts racinaires moyen en fonction de la profondeur et du traitement



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les profondeurs pour un traitement donné (tests statistiques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney).

**** indiquent une différence hautement significative entre les traitements à une profondeur donnée (tests statistiques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney) ($p < 0,001$).*

Figure 5 : Profils de sol au moment de la plantation de la bananeraie en fonction du traitement.

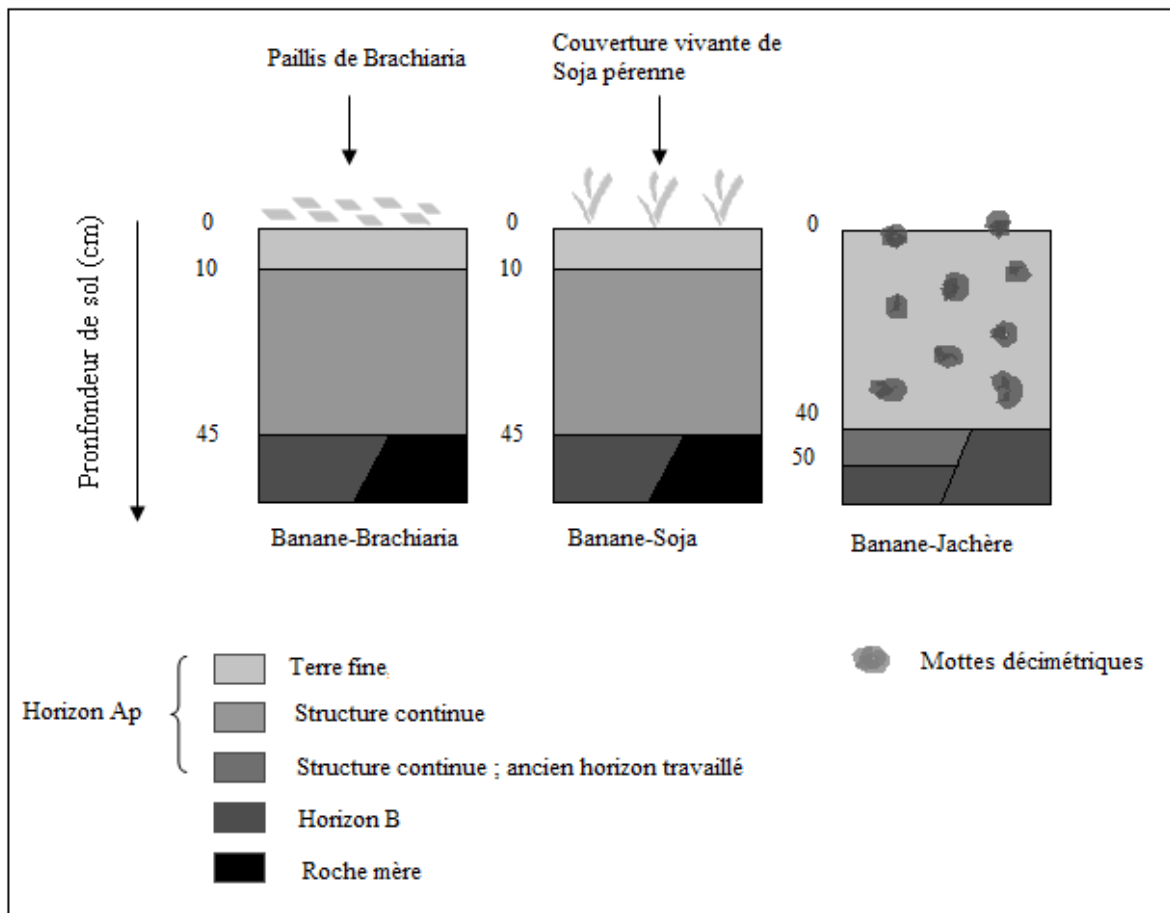
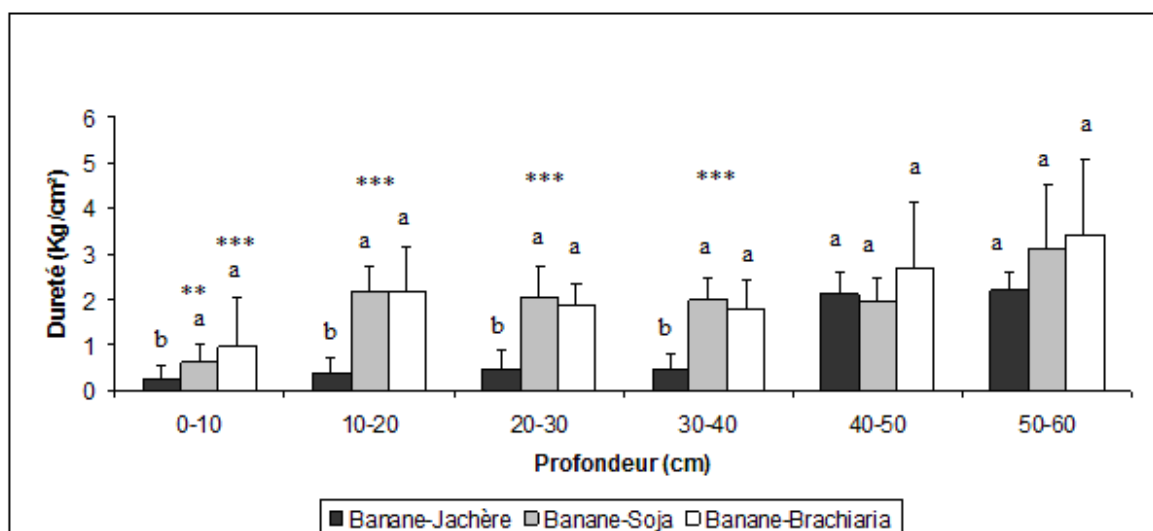


Figure 6 : Variation de la dureté du sol en fonction de la profondeur et du traitement (Moyennes)



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements à une profondeur donnée (tests statistiques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney). (** p<0,01 ; *** p<0,001)



armée par le chevelu racinaire du *Brachiaria*. De 10 à 40/50cm de profondeur, une structure continue s'observe avec un état interne assez poreux parcouru de nombreux trajets racinaires. De 40/50 à 60cm, se trouve soit la roche mère -un tuff volcanique-, soit un horizon B (sol non travaillé) qui présente une structure continue avec une forte porosité tubulaire.

Les profils de sol observés sous couvert végétal vivant de soja pérenne montre de 0 à 10 cm un horizon de terre fine, fragmentaire ; de 10 à 40/50cm s'observe une structure continue moyennement poreuse ; de 45 à 60cm, on observe soit de la roche mère soit un horizon B.

Les profils de sol observés sous la jachère traditionnelle avec travail du sol à la rotobèche montrent de 0 à 40 cm une structure de terre fine fragmentaire avec environ 20 à 50% de mottes décimétriques et une présence de cavités entre les mottes ; la porosité interne des mottes est faible et elles sont traversées par de nombreux trajets racinaires. Entre 40 et 50cm, on peut trouver un horizon B ou un horizon anciennement travaillé avec une structure soudée difficilement discernable et un état interne peu poreux.

b) Dureté du sol

La dureté du sol évolue de manière similaire avec la profondeur pour les traitements Banane-*Brachiaria* et Banane-Soja (**Figure 6**). Pour le traitement Banane-Jachère, de 0 à 40cm de profondeur, la dureté est constante et très inférieure aux valeurs des deux autres traitements.

c) Porosité et Conductivité hydrique

L'analyse statistique (**Tableau 1 et 2**) met en évidence qu'au moment de la plantation l'indice d'air est homogène pour l'ensemble des traitements dans la partie supérieure de l'horizon travaillé (Ap1). Cet indice tend à être supérieur pour le traitement Banane-Jachère du fait du travail du sol à la rotobèche pour les parties profonde (Ap3) et moyennement profonde (Ap2) de l'horizon travaillé mais ne l'est significativement que pour l'Ap2.

A la plantation de la bananeraie, la conductivité hydraulique est significativement supérieure pour le traitement Banane-Jachère ($p < 0,001$) ; alors qu'elle est statistiquement semblable pour les deux autres traitements.

d) Matière organique du sol

Pour les traitements Banane-*Brachiaria* et Banane-Soja, le taux de matière organique diminue avec la profondeur alors qu'il est constant pour le traitement Banane-Jachère. La **figure 7** souligne que la teneur en matière organique du sol ne diffère entre les traitements que pour l'horizon Ap1 où les parcelles Banane-Jachère sont en déficit.

e) Biomasse microbienne

L'analyse statistique ne met pas en évidence de différence significative entre les traitements en termes de biomasse microbienne (**Figure 8**). Par ailleurs, pour les traitements Banane-Soja et Banane-Jachère, la biomasse microbienne est la même quelque soit l'horizon travaillé alors qu'elle diminue avec la profondeur pour le traitement Banane-*Brachiaria*.

Tableau 1 : Indice d'air à la plantation en fonction de la profondeur et du traitement dans l'horizon travaillé. (Moyennes)

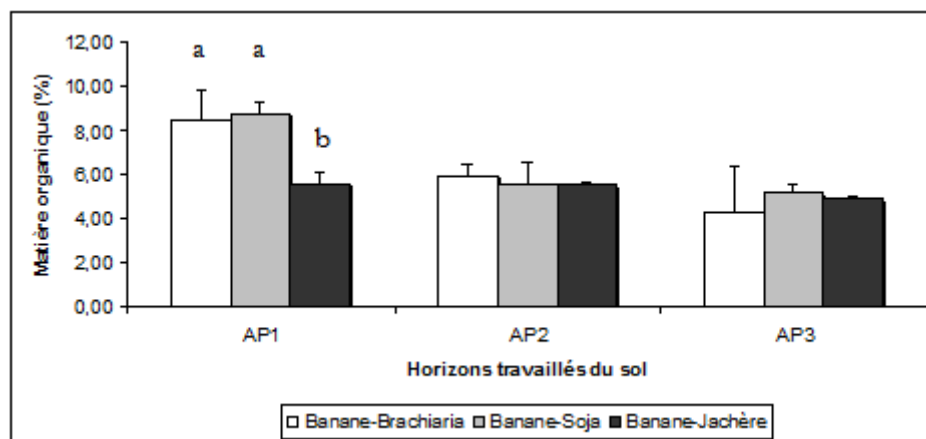
Horizon travaillé	Indice d'air à la plantation		
	Banane-Brachiaria	Banane-Soja	Banane-Jachère
Supérieur (Ap1)	0,81 a	1,08 a	1,05 a
Moyen (Ap2)	0,29 b	0,5 b	1,07 a
Profond (Ap3)	0,43 a	0,45 a	0,59 a

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements pour un horizon travaillé donné (ANOVA et Tukey HSD) ; (** $p < 0,01$).

Tableau 2 : Conductivité hydraulique à la plantation en fonction des traitements (Moyennes)

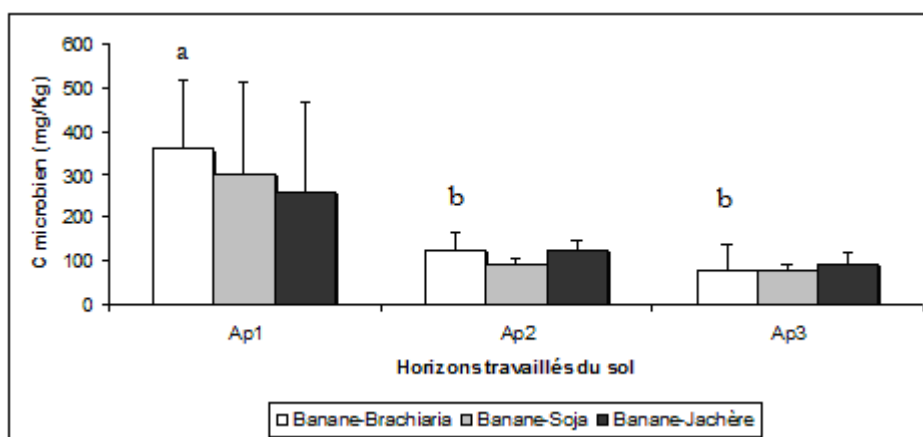
Conductivité hydraulique à la plantation (mm. h ⁻¹)		
Banane-Brachiaria	Banane-Soja	Banane-Jachère
142.44 b	350 b	3280 a

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (ANOVA et Tukey HSD).

Figure 7 : Pourcentage de matière organique moyen en fonction des traitements et de la profondeur

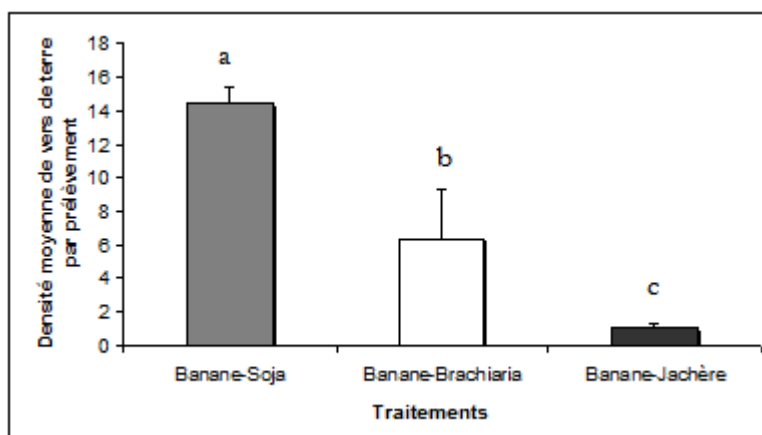
Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements à une profondeur donnée ((ANOVA et Tukey HSD)

Figure 8 : Biomasse microbienne moyenne en fonction des traitements et de la profondeur



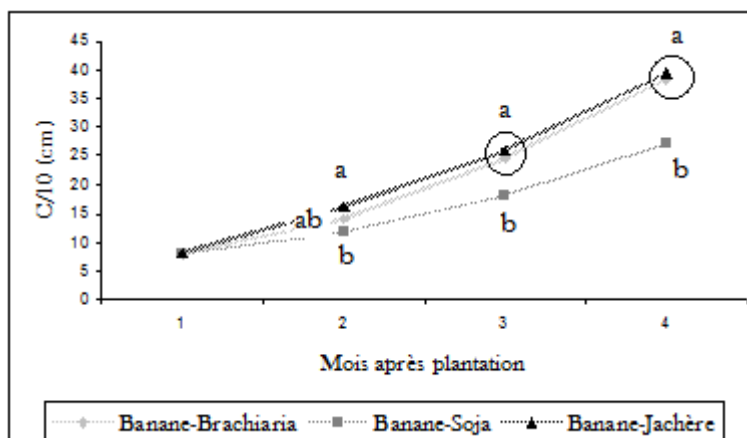
Des lettres différentes indiquent des différences suivant la profondeur pour un traitement donné ((ANOVA et Tukey HSD)

Figure 9 : Densité moyenne de vers de terre prélevés en fonction des traitements



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (ANOVA et Tukey HSD)

Figure 10 : Evolution de la circonférence moyenne des pseudotruncs à 10cm du sol en fonction des traitements



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements à une date donnée ((ANOVA et Tukey HSD)

f) Macrofaune

Seule une espèce de vers de terre a été rencontré sur les parcelles ; il s'agit de l'espèce endogée *Pontoscolex corethrurus*, particulièrement abondante en zone tropicale. La densité de lombric prélevée est statistiquement différente entre chacun des trois traitements. Elle est la plus importante pour le traitement Banane-Soja et la plus faible pour les traitements Banane-Jachère (**Figure 9**).

3. Le fonctionnement de la culture

a) Croissance des bananiers

La croissance des bananiers, mesurée par la circonférence des pseudotruncs à 10cm au dessus du sol (**Figure 10**) est plus importante pour les traitements Banane-Jachère et Banane-Brachiaria.

b) Azote disponible et Nutrition azoté de la bananeraie

La nutrition azotée des bananeraies, mesurée par le taux de chlorophylle des feuilles (**Figure 11**), ne diffère entre les traitements qu'au deuxième mois après la plantation. A cette date, la nutrition azotée des bananiers sur le traitement Banane-Soja est inférieure à celle des deux autres traitements. Pour les mois suivants, la nutrition azotée ne diffère pas en fonction des traitements.

L'azote minéral du sol ne diffère pas en fonction des traitements (**Figure 12**).

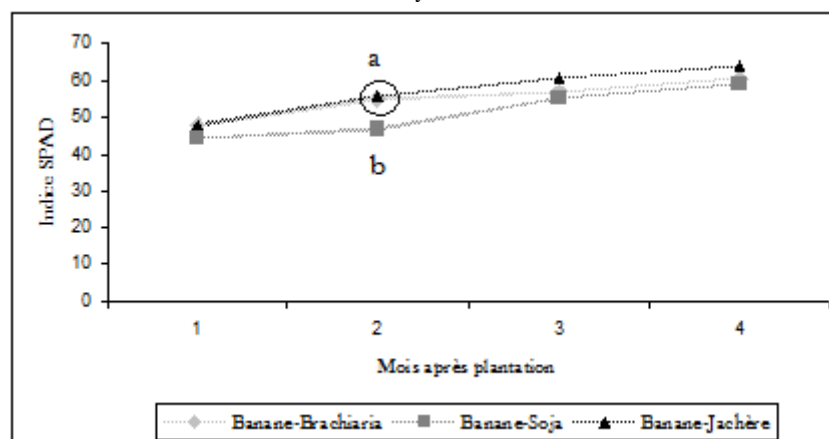
c) Couverture adventice (**Figure 13**)

Les adventices ne se développent quasiment pas sur les parcelles de Soja. Seules quelques levées de *Brachiaria* ont été observées et traitées au Fusilade max (cf. **ITK Annexe 3**). Cette présence de *Brachiaria* est liée à la proximité des parcelles Banane-Soja avec les parcelles Banane-Brachiaria.

Les adventices se développent de manière importante sur le sol nu des systèmes Banane-Jachère ce qui entraine des traitements fréquents pour une tolérance de couverture adventice à 30%.

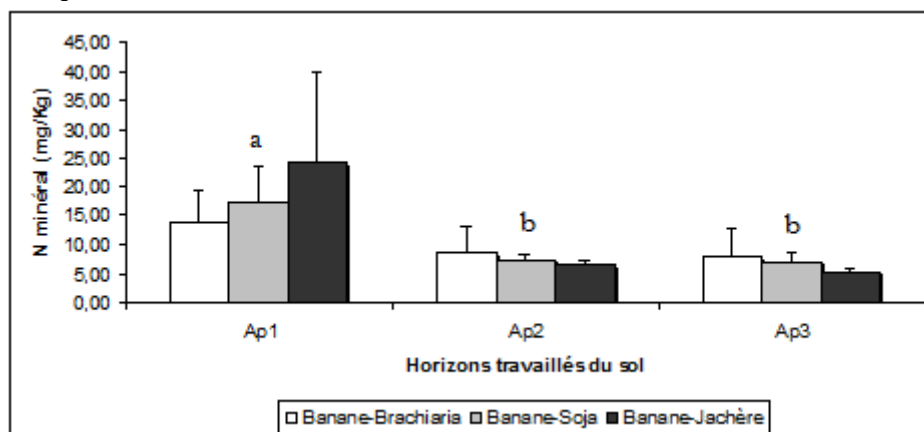
Sur le traitement Banane-Brachiaria, les adventices se développent de manière très hétérogène sur la surface de la parcelle. Elles sont principalement présentes autour des bananiers, sur une surface de sol non couverte par le paillis du fait de la réalisation des trous de plantation des vitroplants.

Figure 11 : Evolution de l'indice SPAD moyen en fonction des traitements



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements à une date donnée ((ANOVA et Tukey HSD)

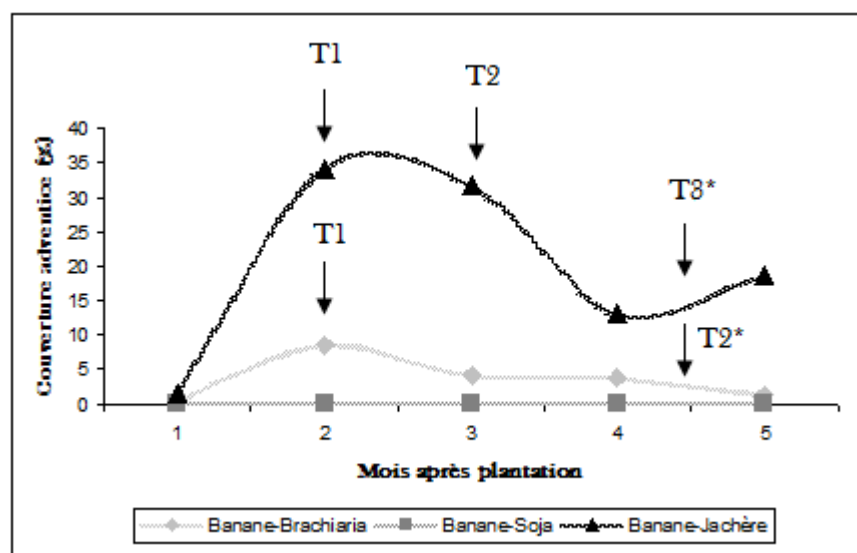
Figure 12 : Azote minéral moyen (NO_3^- et NH_4^+) en fonction des traitements et de la profondeur



Des lettres différentes indiquent des différences suivant la profondeur pour un traitement donné ((ANOVA et Tukey HSD)

Figure 13 : Evolution de la couverture adventice et traitements herbicide appliqués

* Du fait de la disponibilité des techniciens, les traitement marqués d'une astérisque ont du être appliqués avant la prise des photographies ce qui explique qu'ils apparaissent sur le graphique comme ayant été réalisé avant l'atteinte des seuils de 30% et 10% ce qui n'a pas été le cas.



Annexe 3

Itinéraires techniques appliqués aux parcelles du dispositif expérimental

I. Système de culture Banane-Jachère

Semaine	Date	Intervention	Machine/Outils	Produit	Dose
	2007	Piquage de la bananeraie précédente		Glyphosate	2*6mL/bananier
28 mois de jachère naturelle					
15	16/04/10	Herbicide large spectre		Round up	10,87 L/ha
16	22/04/10	Herbicide large spectre		Round up	3,6 L/ha
16	23/04/10	Herbicide anti graminées		Fusilade max	0,54 L/ha
16	23/04/10	Travail du sol	Machine à bêcher Rotobêche		
17	26/04/10	Piquetage			
17	27 et 28/04/10	Trous			
17	28 et 29/04/10	Plantation des vitro plants			
17	29/04/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
21	28/05/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
	Juin	Fertilisation		MgO	
25	23/06/10	Herbicide large spectre		Basta F1	4,06 L/ha
	Juillet	Fertilisation		MgO	
30	29/07/10	Herbicide large spectre		Basta F1	2,9 L/ha
	Août	Fertilisation		MgO	
	Août	Oeilletonnage			
34	27/08/10	Herbicide large spectre		Basta F1	2,9 L/ha
34	27/08/10	Effeuilage			
35	31/08/10	Redressement des bananiers couchés par une tempête tropicale			

II. Système de culture Banane-Brachiaria

Semaine	Date	Intervention	Machine/Outils	Produit	Dose
	2007	Piquage de la bananeraie précédente		Glyphosate	2*6mL/banancier
	Décembre 2007	Herbicide large spectre		Round up	3,6 L/ha
		Faux semis			
	16/01/08	Désherbage	Herse rotative		
	17/01/08	Semis Brachiaria Decumbens			10 kg/ha
28 mois de jachère de Brachiaria					
15	16/04/10	Herbicide large spectre		Round up	10,87 L/ha
16	22/04/10	Herbicide large spectre		Round up	3,6 L/ha
16	23/04/10	Herbicide anti graminées		Fusilade max	0,54 L/ha
16	23/04/10	Travail du sol	Machine à bêcher Rotobêche		
17	26/04/10	Piquetage			
17	27 et 28/04/10	Trous			
17	28 et 29/04/10	Plantation des vitro plants			
17	29/04/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
21	28/05/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
	Juin	Fertilisation		MgO	
25	23/06/10	Herbicide		Basta F1	5,8 L/ha *
	Juillet	Fertilisation		MgO	
30	29/07/10	Désherbage manuel au pied des bananiers			
	Août	Fertilisation		MgO	
	Août	Oeilletonnage			
34	27/08/10	Herbicide large spectre		Basta F1	2,9 L/ha
34	27/08/10	Effeuilage			
35	31/08/10	Redressement des bananiers couchés par une tempête tropicale			

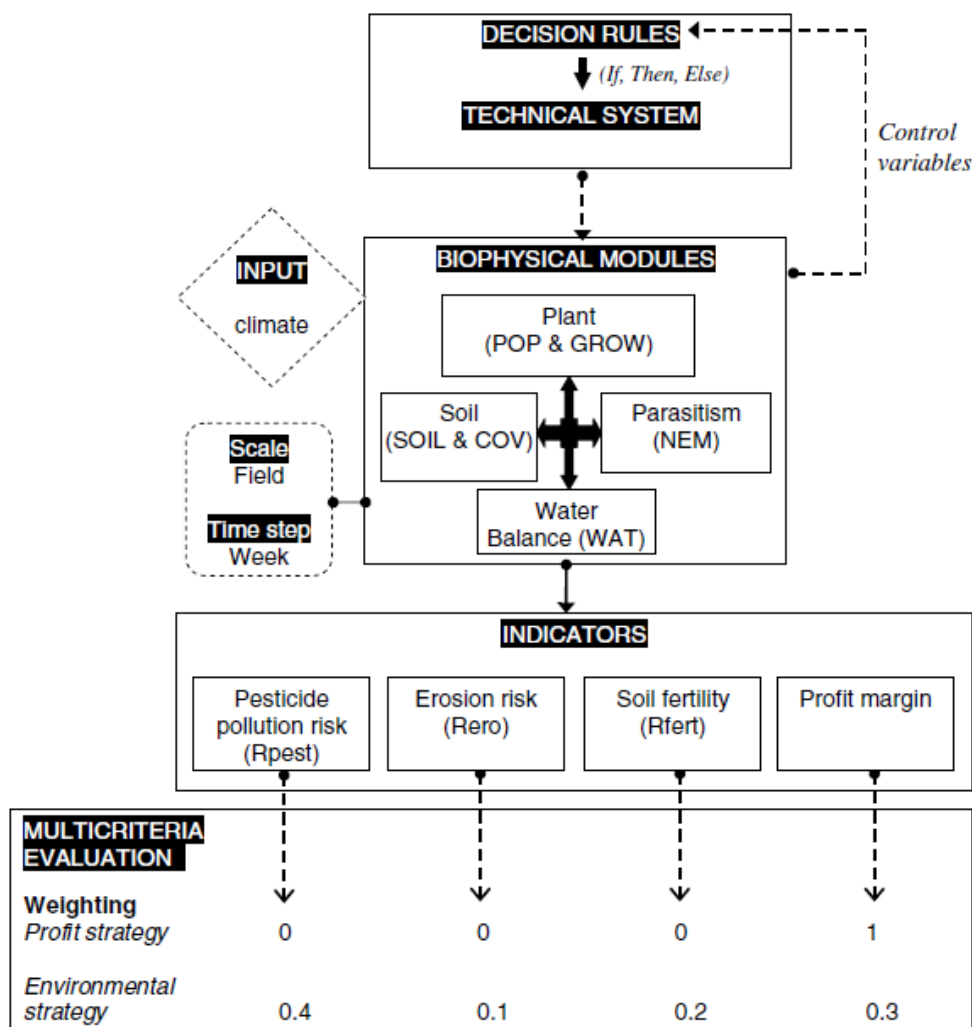
** La quantité épandue pour ce traitement a été largement supérieure à ce qui aurait dû l'être du fait d'une erreur d'application ; il était convenu qu'un désherbage par tâches autour des bananiers soit réalisé ce qui n'a pas été le cas ; par ailleurs, la buse d'épandage utilisé avait un débit trop important par rapport au type de traitement réalisé. Il est raisonnable de ramener cette valeur à 1 pour le calcul de l'IFT Herbicide de ce traitement*

III. Système de culture Banane-Soja

Semaine	Date	Intervention	Machine/Outils	Produit	Dose
	2007	Piquage de la bananeraie précédente		Glyphosate	2*6mL/bananier
	Décembre 2007	Herbicide large spectre		Round up	3,6 L/ha
		Faux semis			
		Désherbage	Herse rotative		
	17/01/08	Semis Soja pérenne			40 kg/ha
28 mois de jachère de Soja pérenne					
17	26/04/10	Piquetage			
17	27 et 28/04/10	Trous			
17	28 et 29/04/10	Plantation des vitro plants			
17	29/04/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
21	25/05/10	Détourage manuel des bananiers			
21	28/05/10	Fertilisation		NPK 14/4/28	
	Juin	Fertilisation		MgO	
	Juillet	Fertilisation		MgO	
30	26/07/10	Détourage manuel des bananiers			
	Août	Fertilisation		MgO	
	Août	Oeilletonnage			
34	27/08/10	Effeillage			
34	27/08/10	Herbicide anti graminées		Fusilade max	2L/ha
35	31/08/10	Redressement des bananiers couchés par une tempête tropicale			

Annexe 4

Structure générale de SIMBA (Tixier et al., 2008)



Structure générale de SIMBA avec :

- les règles de décision décrivant le système de culture évalué ;

- les modules biophysiques :

Population de plantes (POP),

Croissance de la plante (GROW),

Evolution des populations nématodes parasites (NEM),

Structure du sol (SOIL),

Couverture du sol (COV),

Equilibre hydrique (WAT) ;

- et les indicateurs auxquels aboutit le modèle, utilisés pour l'évaluation multicritère des systèmes de culture.

Description de SIMBA GROW

Paramètres

- ddjR** Nombre de degrés jour nécessaire à l'apparition du rejet
Valeur : 1000 / Observé
- ddjF** Nombre de degrés jour nécessaire à la floraison
Valeur : 2170 / Observé
- ddjf** Nombre de degrés jour nécessaire avant la récolte
Valeur : 2790 / Observé
- A** Coefficient d'allocation au rejet
Valeur : 0,07 / Ajusté en fonction des données de répartition de la biomasse finale
- pFEUIL** Part de feuilles dans la biomasse végétative
0,3 / Mesuré
- SLA** Surface Foliaire Spécifique (m^2/g de matière fraîche)
[Interception de la lumière par unité de masse foliaire]
Valeur : 0,015 / Mesuré
- Dens** Densité de plantation (plant/ha)
Valeur : 1840
- Tb** Température de base en °C
Valeur : 14 / Estimé
- epsilonb** Efficience biologique (g MS/MJ)
Valeur : 1.5 / Issu de la littérature : Turner (1994)
- K** Coefficient d'extinction
Valeur : 0.7 / Issu de la littérature : Turner (1994) et Bonhomme et Ganry (1976)

Boucle de croissance

Avec i : le pas de temps du modèle en jour

```

DDJ[i] <- temp[i]
if (temp[i] < ddjR)
  AllocR <- 0
  AllocF <- 0
  AllocV <- 1
else
  if (temp[i] < ddjF)
    AllocR <- A
    AllocF <- 0
    AllocV <- 1-A
  else
    AllocR <- A
    AllocF <- 1-A
    AllocV <- 0

BM[i] <- epsilonb * 0.95 * (1-exp(-k*LAI[i])) * 0.48 * Rg[i] * 10000/dens
BM[i+1] <- BM[i] + dBM[i]
VEG[i+1] <- VEG[i] + dBM[i] * AllocV
LAI[i+1] <- LAI[i] + dBM[i] * AllocV * pFEUIL * SLA / (10000/dens)
REJ[i+1] <- REJ[i] + dBM[i] * AllocR
REG[i+1] <- REG[i] + dBM[i] * AllocF

```



Annexe 5

Les aides publiques de la filière banane

I. Les aides PAC

Axe 1 Aide à la production	Axe 2 Aide au développement rural
POSEIDOM Environ 30 millions d'euros par an	PDRG (Ancien DOCUP : 41 millions d'euros sur 6 ans)

II. Le POSEIDOM

Le POSEI, Programme d'Options Spécifiques pour l'Eloignement et l'Insularité, est instauré en 2006 et succède à l'OCM (Organisation Commune de Marché). Avec le POSEI, le soutien est fixe et n'est plus fonction de la production, c'est pourquoi on parle de découplage de l'aide. La production a une garantie d'écoulement sur le marché européen pour un quota maximum de 77 000 tonnes. En 2007, un nouveau changement intervient dans l'attribution des aides : elle sera distribuée sur la base d'une référence individuelle de production avec un couplage de l'aide à hauteur de 80%, c'est-à-dire que le planteur doit atteindre 80% de sa référence de production pour recevoir 100% de l'aide. Cependant, en raison des perturbations climatiques et des désastres naturels (cyclones), le pourcentage à réaliser est toujours revu à la baisse. Le montant de l'aide POSEI est de 30,8 millions d'euros en 2008.

III. Le PDRG 2007-2013

Le PDR est composé de quatre axes : le premier concerne les aides à la formation, à l'installation des jeunes, et à la modernisation ; le second a trait aux aides sur l'agro-environnement (e.g. MAE*) ; le troisième rassemble les aides liées au développement rural et à la diversification vers les activités non agricoles et enfin le quatrième contient les aides à l'approche LEADER (Liaison entre les actions de développement de l'économie rurale).

MAE : Mesures Agro-environnementales, 2,6 millions d'euros pour la banane pour 2009

Annexe 6

Produits phytosanitaires homologués pour la banane

Produits phytosanitaires homologués pour la banane										Page 1 sur 1						
Date de la revue / publication					Motif et nature de la révision											
07/07/10					Mise à jour											
Version																
VC4																
FONGICIDES	TECTO 20S	Thiabendazole	% MA	Famille chimique	Dose / ha	Cible	Méca d'action	Débit sans pluie	Classification toxico	DL 50	Adjuvant recommandé	Délai avant récolte (jours)	Délai de rentrée (heures)	ZNT (m)	LMR (mg/kg)	
	FUNGAFLOOR 75 C	Imazalil	220 g/L	Benzimidazoles	200 ml / 100 l eau	Chambre et pourtiture de couronne	Systémique à action préventive et curative		XN - N						5	
	TILT 25C	Propiconazole	750 g/l	Triazoles	50g/ha	Pourtiture de couronne	Systémique à action préventive et curative		Xi	2534 mg/kg					2	
	SICO	Difenoconazole	250g/l	Triazoles	0.4 l/ha	Cercosporiose	systémique-curatif		XN - N	2105 mg/kg			1	48	50	0.1
	BANOLE HV	huile minérale	425 g/l	Triazoles	0.4 l/ha	cercosporiose	systémique-curatif		XN - N	2000 - 3000mg/kg			0	48	50	0.1
	GARDIAN	fenpropidine	150g/l	Morpholine	15 l/ha	cercosporiose	systémique-curatif		SC	2000 - 3000mg/kg			0	6	100	0.1
	TEGA	trifloxystrobin	75 g/l	Strobilurines	1 l/ha	cercosporiose	systémique-curatif		XN - N				3	24	100	0.5
	AGRAL 80	octylacrol éther	250 g/l	phyto-pharmaceutiques	0,05 l/ 100 l eau	Adjuvant pour huile fongicide, insecticide et herbicide	systémique-préventif		XN - N	2000 mg/kg			3	48	100	0.05
	HELIOSOL	alcools terpéniques	665 g/l	phyto-pharmaceutiques	1 l / ha				Xi				3	24		0.05
	MOCAP 10 G	Ethionphos	10%	Esters phosphoriques	90 Kg / ha	Nématodes	Contact		T+	62 mg/kg		50				0.02
NEMATOCIDES	VYDATE L	Oxamyl	240 g/l	Carbamate	15 l/ha	Nématodes	systémique - contact		T+	37 mg/kg		3	48		0.01	
	NEMATHORK 10 G	Fosfithiazate	12%	organophosphoré	35 Kg/ha	Nématodes, Charançons	Contact - ingestion		XN - N	57-73 mg/kg		3			0.05	
HERBICIDES	FUSILADE MAX	Flusilop-P-butyl	125 g/l	Aloxyphenoxy-propionate	2 l/ha	anti gram	Systémique	1h	XN - N	3000 mg/kg	non	21	48	5	0.2	
	BASTA F1	Glucinate d'ammonium	150 g/l	Méthoxy- Propanol	5 l/ha	antimonococtandicol	translaminare	6 h	T	595 mg/kg	oui	3	24	5	0.2	
	SURFLAN	Oryzalin	480g/l		2 l/ha			8 h	Sc			90	6	5	0.01	
	TOUCHDOWN Système 4	N-Phosphonométhyl glycine	300 g/l	Amino-phosphonate	2 - 6 l/ha	antimonococtandicol	Systémique	2h	non classé	>5000 mg/kg	non	3	6	5	0.1	
	GLYDOR PLUS	Glyphosate	360 g/l	Amino-phosphonate	3 - 6 l/ha	antimonococtandicol	Systémique	2 à 3 h	Xi		oui	3	24		0.1	
	GLYFOS	Glyphosate	360 g/l	Amino-phosphonate	3 - 6 l/ha	antimonococtandicol	Systémique	2 à 3 h	N	4900 mg/l	oui	3	6	20	0.1	
	REGLONE 2	Diquat	200 g/l	Bipyridile	2 - 4 l/ha	antimonococtandicol	Contact	immédiat	T - N	1389 mg/kg	oui	3	48	5	0.05	
	ROUND UP	Glyphosate	360 g/l	Amino-phosphonates	2-3 l/ha	antimonococtandicol	Systémique	2 à 3 h	Xn, N	5000 mg/kg	oui	21	24	5	0.1	
	ROUND UP FLASH	Glyphosate	450 g/l	Amino-phosphonates	4,8 l/ha	antimonococtandicol	Systémique	2 à 3 h	N	5000 mg/kg	oui	21	6	5	0.1	
	REGULANTS	SUPER CAID BLOC	Bromadiolone	50 mg/kg	Hydroxycoumarine	2 kg/ha (à moduler en fct de infestation)	Rongeur	Anti-coagulant	résistant	Xn	5000 mg/kg					0.1
FRAP BLOC		Disthialone	25 mg/kg	Benzotripiramine	2 kg/ha (à moduler en fct de infestation)	Rongeur	Anti-coagulant	résistant	Xn	5000mg/kg					0.1	

Sources
 - <http://www.agriculture.gov.lv>
 - http://ec.europa.eu/food/infocentre/pesticides/pesticides_database_en.htm

Annexe 7

Formulaire de calcul

Densité apparente

$$d_a = P_s / V_t$$

Densité réel

$$d_r = P_s / V_s$$

Teneur en eau pondéral du sol

$$W = (P_f - P_s) / P_s$$

Indice d'air

$$I_a = V_a / V_s \quad I_v - I_e$$

Indice de l'eau

$$I_e = V_e / V_s$$

$$I_e = W * d_r$$

Indice des vides

$$I_v = V_v / V_s$$

$$I_v = (V_t - V_s) / V_s$$

$$I_v = (V_t / V_s) - 1$$

$$I_v = (d_r / d_a) - 1$$

Indice de fréquence de traitement

$$IFT = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Dose appliquée}}{\text{Dose homologuée}} * \frac{\text{Superficie traitée}}{\text{Superficie totale de la parcelle}} \right) \text{produit } i$$

NB : Produit = herbicides et pesticides

Evaporation du sol
(STICS)

$$EV = ETP * (1 - C_{mulch}) * e^{(-\text{delta} * LAI)}$$

Evapotranspiration potentielle

Formule de Turc

Humidité relative > 50%

$$ETP = n * 0,013 * (R_g + 50) * \frac{T}{T + 15}$$

Evapotranspiration réelle
(STICS)

$$ETR = ETP * \left[1 + \frac{K_{max} - 1}{1 + e^{(-1,5 * LAI - 3)}} \right]$$

Transpiration de la couverture végétale

$$T = ETR - EV$$

Variables utilisées dans les formules

Cmulch	Taux de couverture du sol par le mulch (0 - 1)	
da	Densité apparente	
delta	delta = extin - 0,2	Bananier : extin = 0,7
	extin Coefficient d'extinction de la culture	
dr	Densité réel	
	Pour un Andosol :	
	Horizon A : dr = 2.41	
	Horizon B : dr = 2.61 (Dorel et al., 2000)	
Ia	Indice d'air	
Ie	Indice de l'eau	
Iv	Indice des vides	
Kmax	Coefficient cultural maximal de la culture	Bananier : Kmax = 1,3
LAI	Leaf Area Index ; Indice de surface foliaire	
n	Nombre de jours	
Pf	Poids de sol frais (g)	
Ps	Poids de sol sec (g)	
Rg	Rayonnement global (cal/cm ²)	
T	Température journalière moyenne (°C)	
Va	Volume d'air	
Ve	Volume d'eau	
Vs	Volume de sol	
Vsd	Volume de solide	
Vt	Volume total	
Vv	Volume des vides	
W	Teneur en eau pondérale du sol (g/g)	

Annexe 8

Validation du modèle SIMBA GROW

I. Introduction

L'indicateur de rendement est issu du fonctionnement d'un modèle. Sa validité est donc directement dépendante de la validité du modèle. Il existe au moins trois méthodes permettant de valider un modèle (**Mayer et Butler, 1993**) :

- la méthode visuelle qui consiste à comparer les sorties du modèle avec les mesures de terrain ; le modèle est validé si les deux jeux de données sont semblables ; vivement critiquée pour son manque d'objectivité, cette méthode n'est actuellement utilisée que pour mettre en évidence de possible biais du modèle (**Bockstaller et Girardin, 2003**) ;

- la méthode statistique qui permette d'objectiver la comparaison entre les sorties du modèle et les données observées ;

- la méthode par expertise qui consiste à sélectionner un panel de personnes compétentes dans le domaine et à leur soumettre les sorties du modèle et les données observées.

Compte tenu de la durée du stage, les mesures de terrain n'ont pu être réalisées que sur les 4 premiers mois suivant la plantation. Le jeu de données étant incomplet, une validation par la méthode visuelle a été mise en œuvre afin de réaliser une première évaluation du modèle SIMBA GROW.

Ce sont les LAI du modèle et les LAI observés des bananiers (Leaf Area Index/Indice de surface foliaire) qui ont été comparés par cette méthode.

II. Validation du modèle

1. Méthode

Sur les parcelles expérimentales, la circonférence des pseudotroncs a été mesurée mensuellement ; ces mesures ont permis de calculer le LAI des bananiers grâce à la formule suivante :

$$\text{LAI} = 0,1072 * \text{EXP}(0,0426 * C10)$$

Non publiée

Etablie à partir d'essais menés sur la station de Neufchâteau

Avec C10 : circonférence du pseudotronc 10 cm au dessus du sol

A chaque date de mesures, le temps écoulé depuis la plantation a été converti en degré jour avec les données de la station météo augmentées respectivement de 12%, 5% et 1% pour les traitements Banane-Jachère, Banane-Brachiaria et Banane-Soja afin de prendre en compte l'absence ou la présence d'une plante de couverture sur la parcelle (cf. **Partie 2 ; chapitre 4 A**) ; enfin, les températures ont été rapportées en base 14.

Pour chaque traitement, les valeurs de LAI observées ont été comparées aux valeurs de LAI SIMBA pour un même nombre de degré jour.

2. Résultats

Les résultats obtenus sont présentés **figure 14**.

Quelque soit le traitement, aucune des sorties du modèle ne se superpose avec les données observées. De plus, à la quatrième date, le LAI obtenu par SIMBA sur le traitement Banane-Soja est supérieur à celui des deux autres traitements alors qu'il leur est inférieur pour les données observées. En effet, sur le modèle SIMBA, à partir de la troisième date, une part de la biomasse est allouée au rejet pour les traitements Banane-Jachère et Banane-Brachiaria ce qui freine le développement du LAI.

3. Discussion

Le modèle SIMBA simule la croissance d'un bananier en condition optimale ; la croissance est donc uniquement limitée par la température et le rayonnement global ce qui explique que les sorties de SIMBA soient supérieures aux valeurs mesurées sur la parcelle qui n'est sans doute pas en conditions optimales. En effet, la période sèche de l'année 2010 a été marquée par une sécheresse exceptionnelle qui a pu limiter la croissance des bananiers. Par ailleurs, de nombreux essais ont été réalisés précédemment sur la parcelle où ont été plantés les bananiers ; ces essais ont pu laisser des traces dans le sol (e.g. produits phytosanitaires) susceptibles de limiter la croissance des bananiers.

Par ailleurs, la présence d'une plante de couverture peut introduire une compétition pour les ressources azote et eau avec la culture en place qui pourrait expliquer le retard de croissance du soja. Par ailleurs, l'introduction d'une plante de couverture dans un système de culture entraîne une modification du bilan hydrique notamment en diminuant fortement l'évaporation du sol et donc la température mais aussi l'ETR de la culture (**Célette, 2007**) ce qui peut impacter sur son développement. Enfin, il a été montré que *Neonotonia wightii* (Soja) avait un effet allélopathique fort permettant de lutter contre le développement des adventices (**Damas et al., 2007**). Peu de données sont disponibles quant à cet effet sur le bananier mais il est possible qu'il freine également leur croissance. La canopée de la bananeraie étant à une hauteur supérieure à celle de la plante de couverture, il n'y pas de compétition pour la lumière.

a) Compétition pour l'azote

Les mesures du taux de chlorophylles des feuilles ont été utilisées comme indice de la nutrition azotée des bananiers (cf. **Annexes 2**, mesures SPAD, **figure 11**). L'indice ne diffère entre les traitements qu'au deuxième mois après la plantation. A cette date, la nutrition azotée des bananiers sur le traitement Banane-Soja est inférieure à celle des deux autres traitements. Pour les mois suivants, la nutrition azotée ne diffère pas en fonction des traitements. Une compétition pour l'azote a pu avoir lieu à l'implantation puis un équilibre s'est installé. Cette compétition pour l'azote au deuxième mois a pu introduire un retard de développement des feuilles.

b) Compétition pour l'eau

L'état hydrique des parcelles n'a pas été mesuré par tensiomètre. En revanche, les données acquises (**Annexe 2**) et les équations du modèle STICS (INRA) permettent de calculer l'ETR des parcelles en fonction des traitements. Ce travail est présenté ci-après :

i) Définition des équations

L'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

Sous climat tropical et sur Andosols qui sont des sols à haute teneur en eau, il est raisonnable de considérer que l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration maximale, l'énergie étant le seul facteur limitant. L'ETR peut alors être calculée par l'équation suivante issue du modèle STICS (INRA) :

$$ETR = ETP * \left[1 + \frac{K_{max} - 1}{1 + e^{-1,5 * LAI - 3}} \right]$$

Avec *ETP* : évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Turc
(cf. Formulaire de calculs en **Annexe 7**)

K_{max} : Coefficient cultural maximal de la culture

LAI : Leaf Area Index - Indice de surface foliaire

→ Ce mode de calcul de l'ETR est applicable au système de culture Banane-Jachère pour lequel il n'y a qu'une plante cultivée sur la parcelle.

→ Pour le système Banane-Soja, le *K_{max}* et le *LAI* doivent être représentatifs des deux plantes en place sur la parcelle. Le *K_{max}* a été calculé comme la moyenne des *K_{max}* du bananier et du soja pondérées par leur *LAI_{max}* respectif. Le *LAI* est la somme des *LAI* du bananier et du soja au temps *t*.

→ Pour le système Banane-Brachiaria, la difficulté consiste à prendre en compte l'absence d'évaporation du sol du fait de la couverture totale du sol par le paillis au moment de la plantation. Pour cela, il faut calculer l'évaporation du sol dans un système Banane-Jachère et le retrancher à l'ETR de ce système :

$$ETR = ETP * \left[1 + \frac{K_{max} - 1}{1 + e^{-1,5 * LAI - 3}} \right] - EV$$

Avec *EV* : évaporation d'un sol nu dans un système Banane-Jachère calculée par une équation du modèle STICS (INRA)

$$EV = ETP * (1 - C_{mulch}) * e^{(-\Delta * LAI)}$$

C_{mulch} : taux de couverture du sol par le mulch (0 - 1)

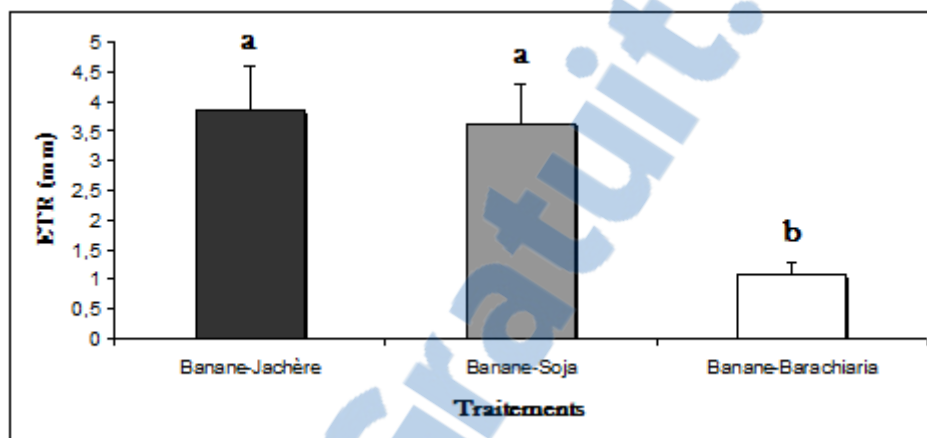
Delta = coefficient d'extinction de la culture (*extin*) - 0,2

Extin banane = 0,7

ii) Comparaison des ETR des 3 systèmes de culture

Les ETR des systèmes de culture Banane-Jachère, Banane-Soja et Banane-Brachiaria ont été calculées à partir des équations déterminées ci-dessus avec les données enregistrées sur le dispositif expérimental un mois après la plantation (**Annexe 2**). Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R 2.10.1.

Figure 15 : ETR journalier moyen des différents systèmes de culture calculée un mois après la plantation des bananiers.



Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements (tests statistiques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney).

Ces analyses (**Figure 15**) mettent en évidence que la présence d'un paillis de *Brachiaria* entraîne une forte diminution de l'ETR ; l'évaporation du sol est en effet nul du fait de sa couverture par le paillis. En revanche les ETR des systèmes Banane-Jachère et Banane-Soja sont semblables. Ce résultat ne permet pas de conclure à une compétition pour la ressource en eau sur le système Banane-Soja. Cependant, les essais de **Damour et Dorel** (résultats non publiés), ont mis en évidence qu'en période de sécheresse, la croissance des bananiers en association avec le soja était freinée alors qu'en conditions hydriques non limitantes, la croissance observée était la même que pour des bananiers sur sol nu. Ceci pourrait s'expliquer par le volume de sol exploré par le système racinaire du Soja, plus important que celui exploré par le système racinaire du bananier. En période de sécheresse, le soja pourra explorer plus de volume de sol pour prélever de l'eau que le bananier.

IV. Propositions pour l'amélioration du modèle

a) La compétition pour l'azote

Les mesures de terrain ont mis en évidence qu'une compétition pour l'azote pouvait s'installer entre la plante de couverture et les bananiers. Un facteur de stress azoté pourrait être introduit en présence d'une plante de couverture.

b) La modification du bilan hydrique

Bien que les données disponibles n'aient pas permis de conclure à une compétition de la ressource en eau, il est établi que la présence d'une plante de couverture modifie le bilan hydrique des parcelles.

Des essais supplémentaires sont à mener afin de suivre l'état hydrique des parcelles en présence d'une plante de couverture pour déterminer si une compétition pour la ressource en eau s'installe. Si tel est le cas, un facteur de stress hydrique pourrait être introduit dans la boucle de croissance de **SIMBA GROW**.

Par ailleurs, un module « Bilan hydrique » pourrait être développé sur **SIMBA**, ce dernier pourrait servir, par exemple, à piloter l'irrigation dans les zones de bananeraies irriguées.

V. Conclusion

Le travail effectué ne permet pas de conclure à la validité du modèle **SIMBA GROW**. Il semble qu'il existe des facteurs autres que la diminution de la température sur les parcelles en association avec le soja qui soit à l'origine du retard de croissance constaté.

Ce retard peut s'expliquer par une compétition pour l'azote au moment de l'implantation des bananiers et par une modification du bilan hydrique qui reste à établir.