

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	5
---------------------------	----------

LISTE DES FIGURES.....	7
-------------------------------	----------

I INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE	9
-------------------------------------------------------	----------

I.1 CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE.....	9
I.2 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	12
I.2.1 LE CONCEPT DU BILAN DE L'AZOTE	12
I.2.2 LE CYCLE DE L'AZOTE EN ZONE TROPICALE HUMIDE	15
I.2.2.1 Particularités de la culture bananière	16
I.2.2.2 L'absorption de l'azote par la plante.....	18
I.2.2.3 La décomposition des résidus de culture	19
I.2.2.4 Lixiviation et ruissellement en milieu tropical humide	20
I.2.2.5 Minéralisation de la matière organique du sol.....	21
I.2.2.6 Volatilisation.....	22
I.2.2.7 Dénitrification.....	23
I.3 OBJECTIFS ET STRATEGIE DE RECHERCHE.....	24
I.3.1 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	24
I.3.2 HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	24
I.3.3 DEMARCHE GENERALE	27

II LES TERMES DU BILAN D'AZOTE : DEMARCHE ET PRINCIPAUX RESULTATS ..	30
-----------------------------------------------------------------------------	-----------

II.1 SITE EXPERIMENTAL	30
II.1.1 Caractéristiques générales.....	30
II.1.2 LE SOL BRUN ROUILLE A HALLOYSITE.....	34
II.2 DYNAMIQUE D'ABSORPTION DE L'AZOTE PAR LA CULTURE.....	37
II.2.1 RESUME	37
II.2.2 MATERIAL AND METHODS	37
II.2.3 RESULTS	41
II.2.4 CONCLUSION.....	45
II.3 EFFICACITE DE L'ENGRAIS.....	48
II.3.1 RESUME EN FRANÇAIS	48
II.3.2 MATERIAL AND METHODS	48
II.3.3 RESULTS	53
II.2 DECOMPOSITION DES RESIDUS DE CULTURE	62
II.2.1 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE	62
II.2.2 RESULTATS ET DISCUSSION	67
II.3.3.1 Caractéristiques biochimiques des résidus de bananiers.....	67
II.3.3.2 Cinétique de décomposition et apport d'azote potentiel au système	68
II.3.3.3 Modélisation de la minéralisation des résidus de bananier par le sous-module de STICS	72
II.3.3.4 Alimentation de la plante à partir de l'azote issu de la décomposition des résidus	77
II.3.4 CONCLUSION.....	79
II.4 LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION ET RUISSELLEMENT.....	80
II.4.1 DEMARCHE EXPERIMENTALE	80
II.4.2 RESULTATS ET DISCUSSION	82
II.4.2.1 Bilan des entrées et des sorties d'eau au cours du cycle cultural.....	82
II.4.2.2 Drainage et lixiviation en fonction des positions sur la parcelle.....	83
II.4.2.3 Relations volume drainé/nitrates lixiviés.....	84

II.4.2.4	Concentrations de nitrates dans les eaux de drainage	85
II.4.3	DISCUSSION	86
II.4.4	CONCLUSION.....	87
III	<u>DISCUSSION GENERALE: BILAN DE L'AZOTE EN BANANERAIE</u>	<u>88</u>
III.1	BILAN DE L'AZOTE	88
III.2	DISCUSSION DU BILAN.....	90
III.3	CONCLUSION : EXTRAPOLATION A UNE GESTION BASEE SUR LE SCP.....	92
III.4	BILAN SUR 5 ANS	93
III.5	PRODUIRE LA BANANE AUTREMENT... ..	94
IV	<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</u>	<u>96</u>
	<u>BIBLIOGRAPHIE.....</u>	<u>99</u>

REMERCIEMENTS EN ACROSTICHE !

La présente « prose » me permet aujourd'hui de remercier avec chaleur tout ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail que seule je n'aurais pu effectuer...

Insensés? Non. Confiants, Harry Ozier-Lafontaine, mon directeur de thèse, directeur de l'INRA-APC, André Lassoudière, co-encadrant et responsable du programme bananiers et plantains en Martinique, François Cote, directeur de l'UPR26, Jean-Jacques Baraer, directeur régional du PRAM (2002-2004), et Thierry Goguy, directeur régional du PRAM (2005-2006), m'ont donné l'opportunité de réaliser une thèse au sein d'une collaboration INRA-CIRAD fructueuse.
Merci à chacun.

Nombreux sont ceux qui ont aidés à l'élaboration de ce projet,
à son accomplissement et à sa rédaction.

En premier lieu, je remercie les têtes pensantes aux idées de génie que sont André Lassoudière, Harry Ozier-lafontaine, Yves-Marie Cabidoche, Jorge Sierra et Marc Dorel qui m'ont donné l'élan de départ pour construire un projet ambitieux visant à comprendre le devenir de l'azote dans le système sol-bananaie.

Tous les moyens mis en œuvre par des équipes motivées et compétentes (UPR26 CIRAD, PRAM-IRD, CIRAD Montpellier, INRA APC, INRA Laon) ont permis la réalisation des expérimentations et des mesures de laboratoire. Je remercie donc les membres de ces équipes dont la liste serait trop longue à citer mais qui se reconnaîtront pour leur travail assidu ainsi que pour leur chaleur humaine et leur bonne humeur.

Hauteur, circonférence, matière fraîche, des mesures de longue haleine sur le terrain où l'on n'a pas chomé non plus ! Merci à Juliette Péloponnèse, Maurice Alikier, Théodose Gracient, et Raphael Achard, compagnons de dur labeur sous le soleil de Martinique !

Intentions bienfaitantes de personnes inconnues devenues connues qui par leur dévouement ont bien voulu donner des impulsions significatives à ce travail de thèse.

En n'oubliant donc pas de remercier avec chaleur, du plus profond du cœur Robert Oliver.

Ulysse odyséen, euh, la lettre U est assez difficile! De même que la tâche des rapporteurs Sylvie Recous et Roël Merckx, du président du jury Amadou Bâ et des examinateurs Marc Corbeels, Jorge Sierra et Harry Ozier-Lafontaine, que je remercie d'avoir accepté ces responsabilités.

Le mot merci, au cœur de ce chapitre, me permet de montrer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de façon directe et indirecte à ces travaux, les stagiaires ayant contribué à ce travail, les thésards et VCAT de passage, faisant des remarques ou juste manifestant leur intérêt au sujet de la thèse ou au porteur du projet : Merci à Marie, Laurianne, Larissa, Karine, Louise, Claude, Gaëlle, Julie, Philippe, Aude, Céline et tous les autres...

Elément manquant, voici le passage où je remercie les contributions morales et financières qui sont le nerf de la guerre : merci à la Région Martinique, au Ministère de l'enseignement et de la recherche, à la direction du CIRAD et à la direction de l'unité propre 26, à la direction de l'INRA et à l'Université des Antilles et de la Guyane, ayant permis la réalisation de mes travaux.

Urée, traçage isotopique oui mais la suite ? Je n'oublierai donc pas de remercier ceux qui se sont souciés de mon devenir après-thèse et m'ont donné l'opportunité de réaliser le nouveau chapitre de la thèse afin de valoriser les compétences acquises au cours de cette formation.

Je remercie donc mon directeur de thèse, l' Association Bernard Gregory ABG, l'Association des Jeunes Chercheurs en Guadeloupe AJC, le directeur de l'Ecole doctorale de l'UAG, Michel Dupont, et tout particulièrement mon mentor, Patrick Labbé.

X, chiffre romain bien à propos pour conclure mes remerciements car au cube X^3 ,
il me permet de dire mille mercis à ma famille :
mes parents, mes frères et sœurs de coeur, mon mari et mon premier né pour le sel de ma vie !

Merci à tout ceux que j'aurais pu oublier de citer mais à qui va toute ma gratitude.

AVANT PROPOS

L'expérience écologique des pays de l'Union Européenne a montré la nécessité d'anticiper les problèmes environnementaux liés aux pollutions agricoles diffuses en grande culture.

Aux Antilles françaises, les systèmes de culture intégrant la banane occupent une part importante de la surface agricole utile. Ces systèmes intensifs utilisent de grandes quantités de pesticides et d'engrais minéraux azotés et ce dans des zones où le bilan hydrique excédentaire génère des flux de ruissellement et d'infiltration importants. L'utilisation de ces fortes quantités d'engrais suscite des interrogations quant aux risques de contamination des eaux par les nitrates lixiviés, notamment mis en cause dans la fragilisation des écosystèmes naturels côtiers, mangroves et récifs coralliens, qui sont exposés à tous les flux sortants des autres étages du fait de la proximité des bassins de production et des milieux récepteurs. Ainsi, l'un des enjeux environnementaux majeurs pour les Antilles est de limiter les pollutions des eaux par les pesticides et par les nitrates (directive nitrate 91/76 CEE).

Des travaux de recherche entrepris dans ce cadre à l'Unité Propre de Recherche 26 du CIRAD (UPR26), présente dans le Pôle de Recherche Agronomique de la Martinique (PRAM), et à l'Unité de Recherche Agropédoclimatique (UR-APC) de l'INRA ont pour objectif une meilleure gestion de l'azote dans les systèmes de culture bananiers au regard de l'optimisation de la production et de la minimisation des risques environnementaux.

C'est dans le cadre de cette collaboration inter-institutionnelle que s'inscrivent ces travaux de thèse qui ont pour but (i) d'acquérir les connaissances nécessaires à la compréhension des mécanismes impliqués dans la disponibilité de l'azote et les interactions entre sources (sol, engrais, résidus) et puits (absorption, lessivage, ruissellement) au sein d'une culture bananière et (ii) de réfléchir à des méthodes concourant à l'optimisation des apports d'engrais en fonction des besoins de la plante et de l'azote minéral disponible dans le sol pour limiter les pertes.

Cette thèse est présentée sous forme d'une synthèse de 98 pages comportant trois chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à la présentation de la problématique, de la synthèse bibliographique qui a orienté ce travail et de la stratégie de recherche adoptée. Ensuite, sont présentés dans le second chapitre, les démarches et les principaux résultats obtenus en fonction des principales hypothèses émises. Ce deuxième chapitre inclut deux articles rédigés en anglais qui ont été soumis à des revues faisant appel à des comités de lecture. Les deux articles scientifiques ont été rédigés principalement par le premier auteur, à savoir le doctorant en charge de ces études, en étroite collaboration avec les chercheurs co-auteurs. Le premier, intitulé « **Determination of critical nitrogen dilution curves for two**

contrasting stages of banana crops », a été soumis en juillet 2005 à la revue internationale *Scientia horticulturae*, publiant des travaux afférant aux cultures horticoles ; le second, intitulé « **Banana crop stages determine the fate of nitrogen fertiliser** » a été soumis en mai 2006 dans la revue internationale *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, publiant des travaux afférant à la science environnementale.

Enfin, le troisième chapitre est une discussion générale des résultats et une présentation des perspectives de recherche pouvant découler de ces travaux.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 .Production (MT an⁻¹) et surfaces cultivées (Mha) en banane et plantain dans le monde depuis 1965.
- Figure 2 .Importance des entrées et sorties dans le calcul d'un bilan azoté
- Figure 3. Cycle de l'azote
- Figure 4. Vue schématique d'un bananier à la fructification et de ses rejets (Champion, 1963)
- Figure 5. Schéma des principales transformations du carbone et de l'azote du sol associées aux transformations de la matière organique (d'après Nicolardot, 2001)
- Figure 6. Schéma de la démarche générale adoptée pour ces travaux de thèse
- Figure 7. Carte pédologique de la Martinique (IRD Martinique)
- Figure 8. Pluviométrie et température mensuelles des années 2003 et 2004 au Lamentin (Rivière Lézarde)
- Figure 9. Placettes expérimentales de bananeraie en premier cycle cultural (A), départ de végétation à partir d'un vitroplant : traitement Ban1 et en quatrième cycle cultural (B) : départ de végétation à partir d'un rejet sélectionné : traitement Ban4
- Figure 11. Mineral N in soil (0-60cm) under Ban1 and Ban4 during the crop cycles.
- Figure 12. Climatic characteristics of the site: comparison of monthly average (1999-2004) rainfall and temperature and the monthly rainfall and temperature in 2003.
- Figure 13. Dry matter accumulation in Ban1 and Ban4 treatments during crop cycles.
- Figure 14 Nitrogen uptake in Ban1 and Ban4 during the crop cycles.
- Figure 15. Nitrogen dilution curve of banana in treatments Ban1 and Ban4 compared to the reference curve of Greenwood et al. (1990) (dashed line).
- Figure 16. Development of LAI in Ban1 and Ban4 during their cycles.
- Figure 17. Relationship between N and LAI in Ban1 and Ban4 treatments.
- Figure 18. Experimental design of banana crops in a double row pattern. Location of 200 m rectangular area for soil and plants measurements.
- Figure 19. Apport d'engrais marqué à l'¹⁵N
- Figure 20. Changing in rainfall (mm) and air temperature (°C) after flowering fertiliser supply (10th October 2003)
- Figure 21. Soil water content in percentage and fate in soil of nitrogen 15N fertiliser supply (25g per plant).
- Figure 22. Proportion of mineral N and organic N from fertiliser in the 0-60cm soil layer during 0-45 day period after 15N pulse, expressed par day.
- Figure 23. Incubation au laboratoire de résidus de bananiers.
- Figure 24. Dispositif expérimental de mesure in situ de la décomposition des résidus.
- Figure 25. Dispositif expérimental de mesure de l'efficacité des apports d'azote des résidus durant le cycle de culture 2004.
- Figure 26. Schéma du module de décomposition des résidus de STICS
- Figure 27. Cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers
- Figure 28. Variations de température sous le mulch et dans le sol durant la décomposition des résidus de culture (période du 28/04/04 au 17/05/04)
- Figure 29. Relation exponentielle décroissante de l'amplitude thermique avec la profondeur de sol (Illustration du nitisol sous bananeraie)
- Figure 30. Pourcentage de pertes relatives en C et N des résidus restants (décomposition *in situ*)
Modélisation des pertes en C et N par une exponentielle.
- Figure 31. Simulations des cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus)
- Figure 32. Ajustements des simulations des cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus) avec ajustement
- Figure 33. Ajustements des simulations des cinétiques de minéralisation *in situ* des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus)
- Figure 34. Relation entre %N (A) et % C (B) des organes du bananiers et les % de carbone soluble, hémicellulose, cellulose et lignine
- Figure 35. Pluviométrie et azote minéral dans le sol (0-60 cm) après les apports de résidus de cultures (cycle 2)
- Figure 36. Disposition des lysimètres coniques à mèches capillaires
- Figure 37. Dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion sous bananeraie (Khamsouk, 2001) et disposition des lysimètres à la parcelle
- Figure 38. Drainage (A) et pertes totales en nitrates (B) au cours d'un cycle de culture
- Figure 39. Dynamique du drainage (A) et du lessivage (A) sur la période du 28-05-03 au 28-10-03
- Figure 40. Corrélation entre quantités totales de nitrates lixiviés et volume total d'eau drainé
- Figure 41. Schéma de fonctionnement des systèmes de culture bananiers.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Précédent cultural et itinéraire technique des parcelles expérimentales
- Table.2 Yield components of banana at harvest.
- Table 3. Significance of the correlations (r^2) between the nitrogen content of various organs and the total nitrogen content of the banana tree during cycles 1 and 4.
- Table 4. Physical and chemical properties of clayey nitisol of Martinique
- Table 5. Crop characteristics according to crop cycles.
- Table 6. Dry matter, N and ^{15}N content, and the fertiliser N use (NUE %) in banana plants sampled at flowering time, harvest 1 and harvest 2 (fertilizer supply at floral differentiation).
- Table 7. Dry matter, N and ^{15}N content, and the fertiliser N use (NUE %) in banana plants of two contrasted treatments (fertilizer supply at flowering).
- Table 8. ^{15}N balance in the soil plant system for Ban1 and Ban2 at harvests 1 and 2. Recovery of fertiliser nitrogen is expressed in % of applied.
- Tableau 9. Caractéristiques biochimiques des organes du bananier
- Tableau 10. Rapport C/N des résidus à la fin de l'incubation
- Tableau 11. Décomposition des résidus *in situ*
- Tableau12. Matière sèche, teneur en N total, azote ^{15}N , et efficacité de l'N des résidus
- Tableau 13. Bilan ^{15}N résidus
- Tableau 14. Entrées et sorties d'eau l'échelle de la parcelle au cours du cycle cultural
- Tableau 15. Corrélation entre nitrates lixiviés et volume d'eau drainé avant la floraison
- Tableau 16. Concentrations des nitrates dans les eaux de drainage: comparaison des cycles culturaux.
- Tableau 17. Bilan N pour Ban1 et Ban4 (cycle cultural mai 2003-janvier 2004)
- Tableau 18. Bilan N pour un cycle cultural de 5 ans

I INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE

I.1 CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

En terme de valeur brute de production, la banane occupe le 4^{ème} rang mondial des cultures vivrières, après le riz, le blé et le maïs. La surface cultivée en bananes et plantains, ainsi que la production à l'échelle mondiale sont en constante augmentation depuis 1965 (Fig.1).

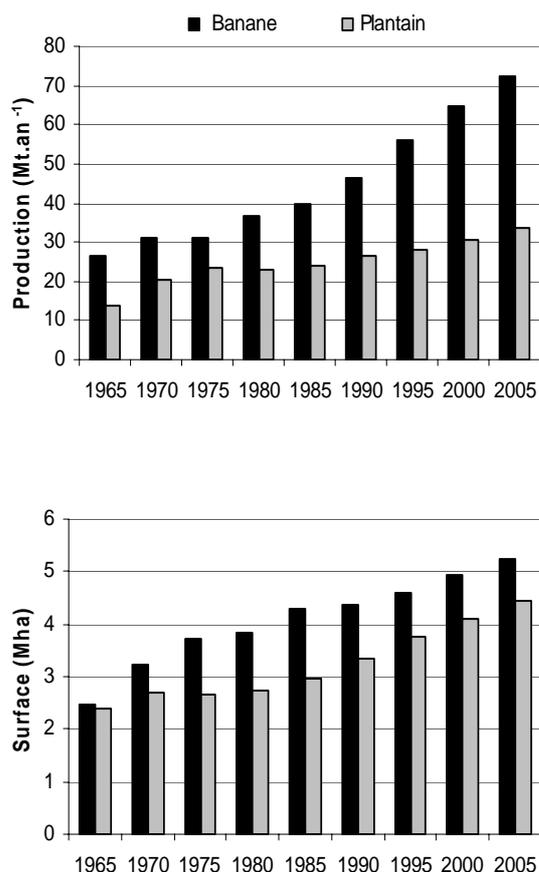


Figure 1. Production (MT an-1) et surfaces cultivées (Mha) en banane et plantain dans le monde depuis 1965. (Sources FAO Statistical Database (<http://apps.fao.org>), 2006).

Le plantain est essentiellement produit en Afrique (22.4 MT en 2000) pour un usage domestique.

En revanche la banane, majoritairement produite en Asie (31.1 MT) et en Amérique du sud (16.7 MT), est massivement exportée vers les pays non producteurs, Etats Unis et Union Européenne en tête. Depuis 1993 et l'instauration de quotas favorisant dans l'Union Européenne l'importation de bananes en provenance des pays ACP (Afrique, Caraïbe, Pacifique), une guerre commerciale a lieu entre les Etats Unis - dont les compagnies

détiennent l'essentiel des grandes plantations bananières d'Amérique centrale et du Sud - et l'Europe.

Suite aux pressions économiques et à l'influence de l'Organisation Commune des Marchés qui qualifie le système de quotas de discriminatoire, depuis début 2006, les bananes en provenance des pays asiatiques et d'Amérique du sud, arrivent sur les marchés de l'Union Européenne sans limite de volume.

Le marché de l'exportation, à lui seul, vaut près de 5 milliards de dollars par an, représentant une source importante d'emplois et de revenus pour plusieurs pays en développement. Les pays d'Amérique latine et des Caraïbes assurent la production de la majeure partie des bananes fruits échangées dans le monde soit environ 10 MT. Aux Antilles françaises, La

banane fruit pour l'exportation occupe 30 % de la surface agricole en Martinique, 15% en Guadeloupe (Agreste Dom, 2003), et est le premier produit d'exportation (144 M€ en Martinique). Elle représente 49,5% de la production agricole finale, génère près de 40% des recettes d'exportation et emploie 80% de la population active agricole soit 15 000 emplois directs et indirects en 1997.

Dans de nombreuses régions de monoculture intensive de la banane, les techniques culturales utilisées infligent de sérieux dommages à l'environnement (Mc Donald *et al.*, 1999 pour Sainte Lucie ; Castillo *et al.*, 2000 pour le Costa Rica). Déboisement, érosion (Khamssouk, 2001), niveaux élevés d'intrants, utilisation de plastique, niveaux élevés de mécanisation sont les principaux phénomènes générateurs de risques de dégradation de l'environnement par les exploitations bananières (Astorga, 1998 ; Bonan et Prim, 2001 ; Cabidoche, 2001). Ces pratiques intensives sont aujourd'hui directement mises en cause dans les *phénomènes* de pollution terrestre et marine. La pollution par les pesticides, notamment, est alarmante: en 1999, une unité de production d'eau de source a dû cesser sa production suite à la découverte dans les eaux de résidus de pesticides; en 2000, trois matières actives zoocides, théoriquement interdites d'utilisation, ont été détectées à des teneurs bien supérieures aux normes anciennement admises (Gaumand *et al.*, 2005). La concentration en pesticides dans les chaînes alimentaires des espèces aquatiques côtières et la régression des coraux sont autant d'alertes pour le milieu marin. Par ailleurs, les quantités d'azote apportées, allant jusqu'à 400 kg.ha⁻¹.an⁻¹ principalement sous forme d'engrais mixte N-P-K-Mg, peuvent être trois fois supérieures à celles exportées par la plante. Des phénomènes de lessivage ou de transferts superficiels de solutés lors du ruissellement diminuent l'efficacité des apports d'engrais. Le lessivage, notamment, peut être exécuté par un faible excédent pluviométrique (en saison sèche par exemple) occasionnant des flux sortants à des concentrations élevées (Cabidoche *et al.*, 2001). Les risques pour la fertilité des sols et l'environnement sont donc élevés, à court et long terme.

Pour sortir du système agricole productiviste, générateur de taux de pollution importants, la mise en place d'une agriculture raisonnée aux Antilles s'impose (Ganry, 2001). Généralisée en Europe, la codification des « bonnes pratiques agricoles » relatives à la gestion de l'azote (2 décembre 1991) se met en place dans les milieux insulaires, fragiles, et soumis à des pressions d'origines multiples : touristique, agricole, urbaine. Les acteurs de la filière semblent être parvenus à un consensus sur les objectifs à atteindre, une production de bananes de qualité, respectueuse de l'environnement et à haute valeur ajoutée. La recherche doit par conséquent imaginer des systèmes de cultures et itinéraires techniques adaptés au milieu, en

vue d'une limitation des risques de pollution ou de dégradation du milieu, tout en maintenant la rentabilité économique. Dans ce cadre, le CIRAD (Unité Propre de Recherche UPR26) et l'INRA (Unité de Recherche APC) ont défini des programmes de recherche en collaboration sur les modalités d'amélioration des systèmes de culture et des itinéraires techniques afin que la culture bananière réponde au mieux aux exigences de multifonctionnalité de l'agriculture : viabilité économique, respect du cadre de vie, respect de l'environnement. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans cette perspective et ont pour objectif une meilleure évaluation et compréhension des mécanismes de transformation / évolution de l'azote au cours du cycle de la culture.

I.2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente un état de l'art sur les différents concepts d'approche du bilan de l'azote au regard des aspects originaux soulevés par la culture bananière dans les conditions pédoclimatiques des tropiques humides.

I.2.1 Le concept du bilan de l'azote

La nutrition de la plante et la fertilisation azotée sont des facteurs essentiels dans la détermination du rendement et de la qualité de la production agricole en milieu tropical. En effet, les sols tropicaux sont fréquemment limités par la biodisponibilité de l'azote, ce qui n'est pas liée à la teneur en matière organique totale, mais à la taille de la fraction labile (Sierra et Marban, 2000).

Il existe plusieurs méthodes pour diagnostiquer le statut nutritionnel des cultures en vue d'optimiser le dosage des apports d'azote nécessaires pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité de la culture. Parmi ces différentes méthodes de diagnostic, certaines se fondent sur l'utilisation d'indicateurs sol, d'autres, sur l'utilisation d'indicateurs plante.

L'optimisation de la fertilisation azotée à partir d'indicateurs sol recourt à des analyses de l'azote biodisponible et/ou de l'azote potentiellement minéralisable. L'optimisation de la fertilisation azotée fondée sur les indicateurs plantes repose sur des analyses de feuille, de sève, de jus de pétioles, ou de teneur en chlorophylle, indiquant le statut azoté de la plante et permettant ainsi de situer la culture par rapport à sa courbe critique de dilution de l'azote (Tei *et al.*, 2001 ; Lemaire et Gastal, 1996 ; le Bot *et al.*, 1995) ou à un autre référentiel (Beaufils, 1973). Ces méthodes de gestion de la fertilisation présentent plusieurs limites en milieu tropical.

Dans le cas des interprétations à partir des indicateurs sol, l'incertitude est principalement liée à la variation temporelle des teneurs en azote minéral du sol en relation avec le lessivage qui a un poids important en milieu tropical humide. Les interprétations à partir des analyses d'organes des plantes se heurtent, pour leur part, à la difficulté de se rapporter à un référentiel des besoins critiques dans le cas de cultures tropicales, peu étudiées. Pour les milieux tempérés, l'utilisation des référentiels « plante » a été facilitée par la généralisation des courbes critiques de dilution de l'azote en fonction des plantes en C3 et C4 (Greenwood *et al.*, 1990 ; Le Bot, 1995 ; Lemaire et Gastal, 1996). D'autres auteurs (Beaufils, 1973 ; Lopes, 1998 ; Hallmark et Beverly, 1991 ; Walworth et Sumner, 1987), ont mis au point un référentiel des analyses plante pour les cultures fruitières, appelé DRIS « Diagnosis and Recommendation

Integrated System ». Ce référentiel, utilisé aux Etats-Unis, au Canada et en Chine, repose sur l'évaluation des proportions respectives des différents nutriments dans la plante, et permet d'en faire un diagnostic (excès, déficiences) sans se référer au bilan nutritionnel général. Cependant, cette méthode, sensible à la maturation des tissus et à l'âge de la culture, a une valeur générique limitée (Baldock et Schulte, 1996).

Face aux difficultés posées par ces méthodes de gestion plusieurs auteurs (Recous *et al.* 1997 ; Tremblay, 2001) ont montré la nécessité de réaliser un bilan d'azote pour déterminer, dans un premier temps, l'importance relative des facteurs affectant les teneurs en azote biodisponible et ainsi permettre de proposer une meilleure gestion.

Le concept du bilan de l'azote est un concept plus global que les précédents, au sein duquel on distingue les processus du cycle de l'azote (Fig.2) qui apportent au sol l'azote assimilable à la culture et nécessaire à leur croissance (entrées) de ceux qui libèrent et rendent l'azote indisponible (sorties).

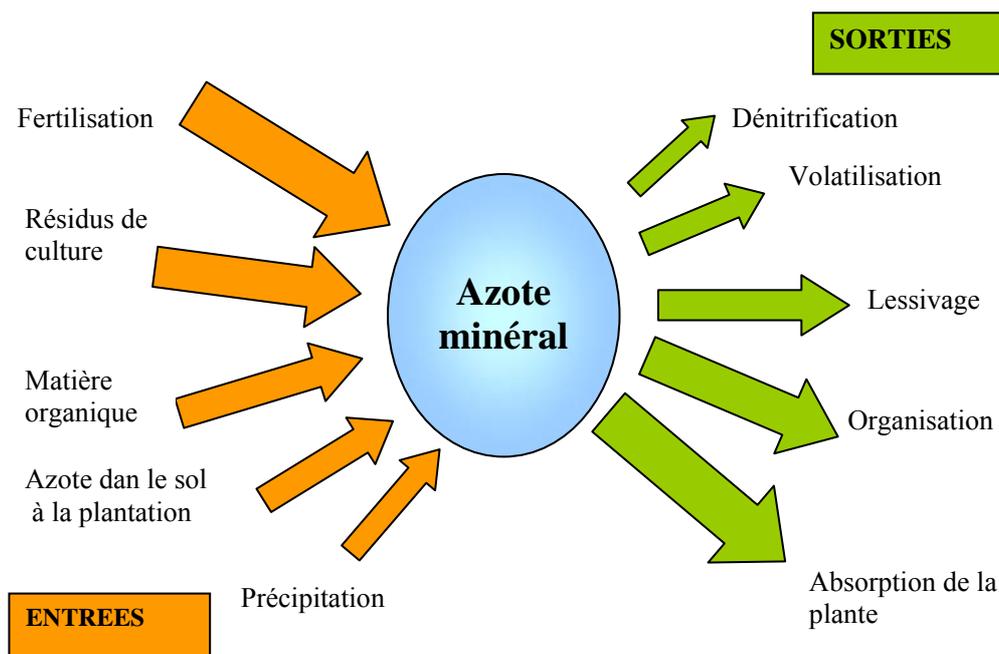


Figure 2. Importance des entrées et sorties dans le calcul d'un bilan azoté

Cette approche, utilisée depuis plus de 30 ans en France (Rémy et Hébert, 1977) consiste à calculer la quantité d'engrais à apporter en égalisant les besoins d'azote de la parcelle et les fournitures d'azote minéral du sol. Recous *et al.* (1997) ont proposé une amélioration de la méthode initiale, prenant en compte le fait que l'azote de l'engrais n'est pas totalement disponible pour la culture en raison de son interaction avec le cycle interne de l'azote dans le sol. Ceci se traduit par l'équation suivante :

$$(Pf-Pi) +Rf = (X-Ix-Gx) +M'n +Ri - L \quad (1)$$

où P_i , est la quantité d'azote accumulée dans le peuplement à l'ouverture du bilan,

P_f , est la quantité d'azote accumulée dans le peuplement à la fermeture du bilan,

R_i , est la quantité d'azote accumulée dans le sol à l'ouverture du bilan

R_f , est la quantité d'azote accumulée dans le sol à la fermeture du bilan

M_n est la minéralisation nette du sol en l'absence d'apport d'engrais,

L est le lessivage,

X est la dose d'engrais à apporter calculée par différence,

I_x est l'écart d'organisation entre la dose 0 (culture non fertilisée) et la dose X ,

G_x sont les pertes gazeuses liées à l'apport X .

Puisqu'il tient compte du déterminisme des teneurs en azote biodisponible pour chaque système cultivé, l'utilisation d'un bilan azoté pour évaluer, améliorer et même formuler des systèmes de diagnostic de fertilisation est considérée comme étant l'approche la plus pertinente (Tremblay, 2001). Le bilan déterminé pour un système et pour une année donnée, peut permettre une extrapolation temporelle en fonction des variations climatiques annuelles. Le recours à des modèles dynamiques de fonctionnement de culture (STICS, Brisson *et al.*, 1998 ; LIXIM, Mary *et al.*, 1999) évalués au champ, constitue, dans ce cadre, une alternative séduisante. Cependant, en raison du coût opérationnel élevé de paramétrisation de ces modèles, leur usage est souvent restreint à l'évaluation du fonctionnement de certains compartiments du cycle de l'azote au sein d'un système de culture donné (Nicolardot *et al.*, 2001 ; Sierra *et al.*, 2003).

A l'usage des centres techniques et des agriculteurs, de nombreux outils de diagnostic et de gestion de la fertilisation azotée fondés sur la méthode du bilan et intégrant les risques de pertes d'azote sous forme de nitrates ont été mis au point en France: AZOBIL (Machet, 1990), et plus récemment AZODYN (Machet, 2003 ; Dubrulle, 2003) prenant en compte les pertes d'ammoniac ou de protoxyde d'azote par voie gazeuse, en cours de validation.

En ce qui concerne les cultures en milieu tropical, il existe peu de travaux relatifs à l'optimisation de la fertilisation azotée. L'accent a surtout été porté sur la maximisation des rendements durant ces 20 dernières années et ce n'est que récemment que la recherche s'est intéressée à l'optimisation des rendements avec une préoccupation environnementale.

Des tentatives d'application de la méthode DRIS dans les systèmes de culture tropicaux (Ewali, 1984, pour la canne à sucre au Brésil ; Teixeira, 2002, pour la banane) se sont heurtées aux limites sus mentionnées de ce référentiel. L'optimisation de la fertilisation azotée en zone tropicale repose par conséquent fréquemment sur des méthodes locales pouvant varier selon le type de culture. Un exemple de cette démarche est le SCP ou « seuil

critique de pluviométrie » mis au point aux Antilles pour la gestion de la fertilisation azotée du bananier par Godefroy et Dormoy (1989), et qui demeure à ce jour, la référence en terme de recommandations. Cette méthode propose un fractionnement des apports d'engrais en fonction du SCP. Un apport d'engrais est effectué dès que le seuil est atteint (200 mm pour tous les cycles sur les sols bruns andiques). Cette méthode vise à maintenir dans le sol une teneur en azote comprise entre une « teneur minimale critique », suffisante pour permettre une alimentation correcte de la plante et une « teneur maximale critique », au-dessus de laquelle la lixiviation devient excessive (50 mg.kg^{-1} de N minéral quel que soit le sol). L'efficacité de l'engrais, raisonnée selon le SCP, est ainsi évaluée uniquement à partir des pertes potentielles par lixiviation et ne prend pas en compte la concurrence des autres processus du cycle interne de l'azote comme l'organisation de l'engrais, qui peut concurrencer l'absorption de l'azote de la culture au cours du cycle, et limiter les pertes par lixiviation à la fin de la saison de culture.

I.2.2 Le cycle de l'azote en zone tropicale humide

Le cycle général de l'azote en système cultivé est représenté sur la figure 3.

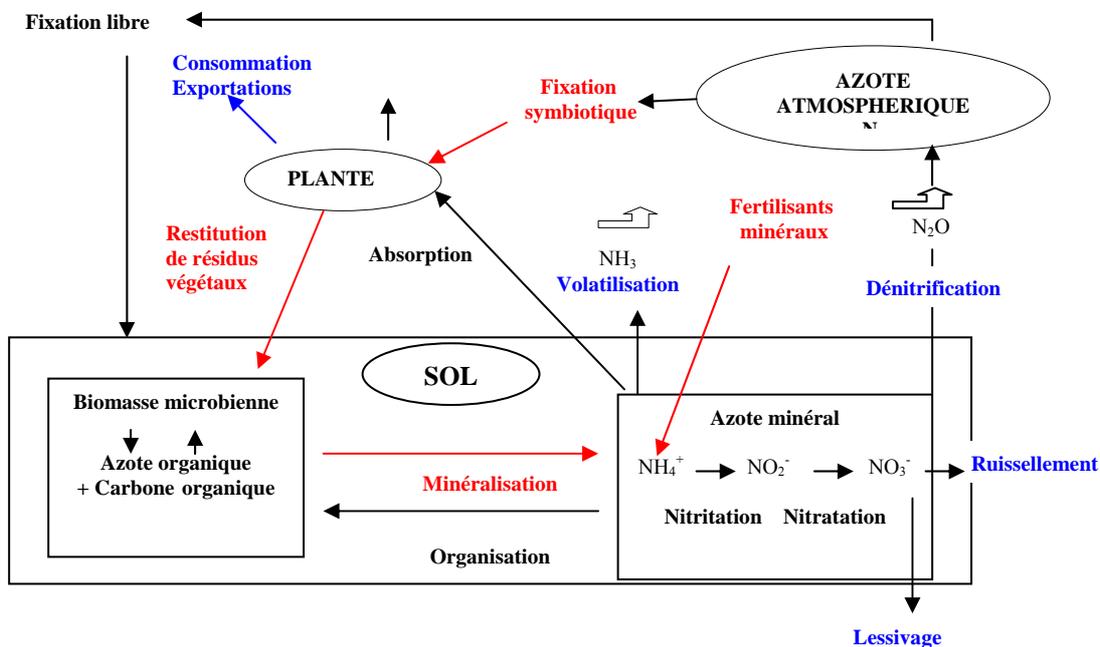


Figure 3. Schéma du cycle de l'azote en système cultivé

Les éléments figurés en rouge contribuent à la fourniture d'azote biodisponible et les éléments figurés en bleu, aux pertes d'azote pour la culture.

Tous les éléments du cycle de l'azote ne sont pas obligatoirement présents dans les systèmes cultivés. La fixation symbiotique par exemple est réalisée dans les systèmes de cultures en association avec des légumineuses capables de fixer l'azote atmosphérique et de le restituer

lors de transferts plante à plante (exsudats racinaires) ou lors de leur décomposition (Bowen *et al.*, 1993; Dubach et Ruselle, 1994 ; Motisi, 2005). Les plantes mycorhizées peuvent également réaliser ce type de fixation grâce à leur symbionte (Declerck, 1999; Roggy *et al.*, 2004; Bâ *et al.*, 2004).

La restitution des résidus de culture, réalisée dans les systèmes de cultures pérennes, apporte du carbone et de l'azote organique qui sont utilisés comme substrat énergétique par les micro-organismes hétérotrophes qui décomposent les matières organiques et peuvent restituer de l'azote biodisponible à la culture.

Les apports de fertilisants minéraux (engrais et fumure), très répandus dans les systèmes de cultures intensifs, interagissent avec le cycle interne de l'azote dans le sol (organisation, minéralisation).

Les éléments entraînant des pertes d'azote pour les systèmes cultivés (volatilisation, dénitrification, lessivage et ruissellement) sont fonction des conditions pédoclimatiques (pluviométrie et pH du sol essentiellement) et, du type et des quantités d'azote biodisponible dans le sol.

I.2.2.1 Particularités de la culture bananière

Avant d'aborder la synthèse des travaux traitant des différents termes du bilan de l'azote en milieu tropical, il est nécessaire de préciser quelques particularités de cette plante et de sa culture qui peuvent conditionner la mise en oeuvre du bilan de même que les méthodes de mesures requises pour son évaluation. On peut retenir trois particularités que sont (i) la grande taille de la plante, (ii) le cycle semi-pérenne de la culture intégrant la restitution de résidus de culture, (iii) le caractère fortement redistributif de la pluie et son incidence éventuelle sur les transferts hétérogènes des solutés.

Le bananier (*Musa acuminata*) de la variété grande naine du groupe des Cavendish est la plus utilisée aux Antilles françaises (Fig.4). C'est une herbacée pérenne du groupe des monocotylédones appartenant à la famille des Musacées. Il s'agit d'une plante de grande taille pouvant atteindre 2 à 5 m à la récolte (Champion, 1963).

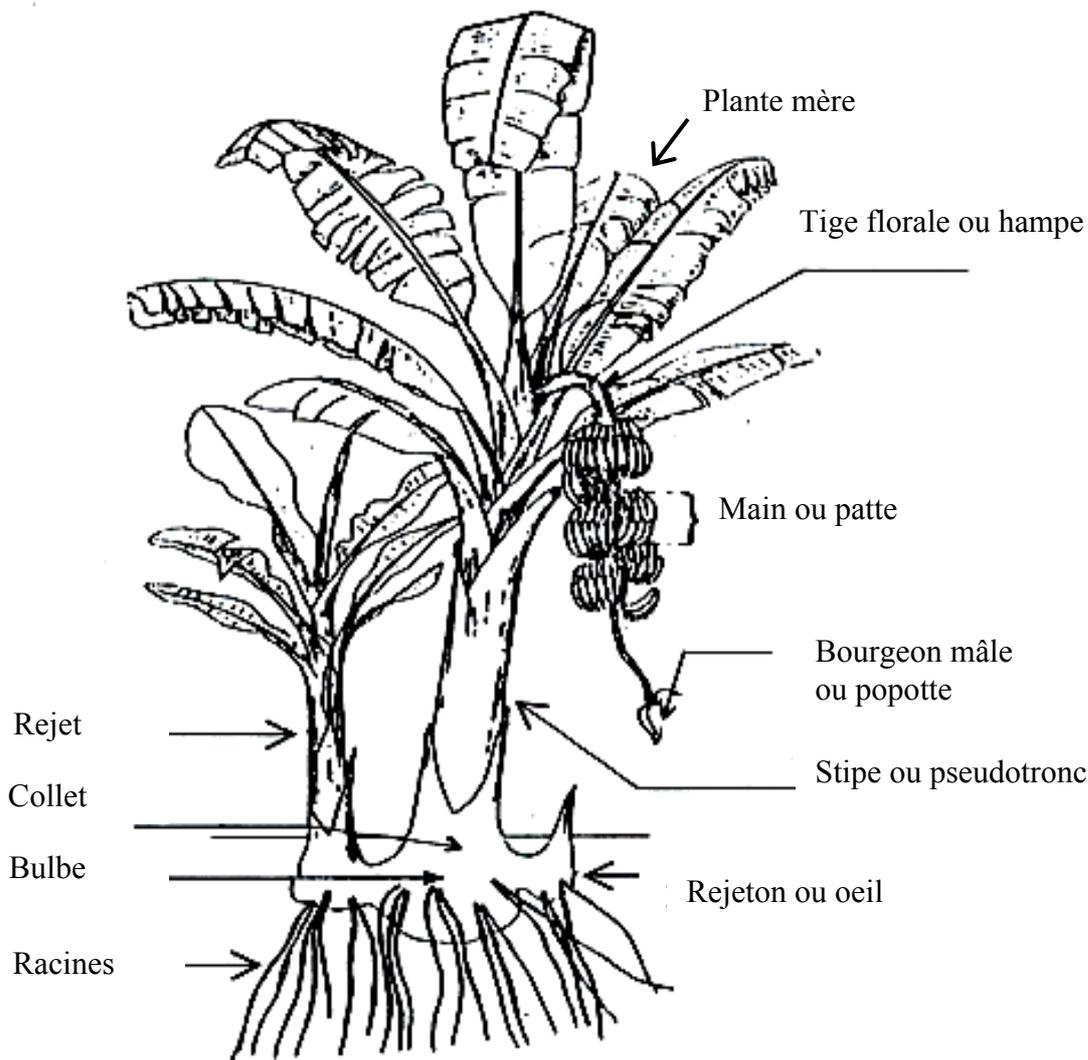


Figure 4. Vue schématique d'un bananier à la fructification et de ses rejets (Champion, 1963)

C'est une plante annuelle proprement dite car il faut couper entièrement le régime lors de la récolte; mais elle peut être considérée comme vivace dans son cycle de reproduction car c'est à partir des rejets latéraux que démarre un nouveau cycle (Lassoudière, 1978 ; Lassoudière, 1980). La pérennité du bananier est ainsi assurée par ce mode de reproduction végétatif au moins pendant 5 ans pendant lesquels la population des bananiers de la culture croît de façon de plus en plus désynchronisée (Tixier, 2004). Ainsi aux Antilles, tous les 5 à 7 ans, la replantation des bananeraies intensives est rendue nécessaire à cause de la perte de rendement liée à la désynchronisation du peuplement, à la diminution du nombre de pieds productifs, à la dégradation des conditions sanitaires - nématodes et charançons -, et au coût d'assainissement. La replantation s'effectue généralement après (i) des labours profonds et répétés à 60 cm de profondeur, précédés de passages de cultivateurs lourds destinés à hacher les résidus de la culture précédente, et (ii) au moins 6 mois de jachère ou de rotation avec une autre culture (canne, ananas le plus souvent).

L'architecture particulière du bananier, possédant de larges feuilles érigées verticalement pour les plus récentes et horizontalement pour les plus anciennes, génère des flux hétérogènes de redistribution de l'eau au sol caractérisés par une forte concentration le long du pseudotrunc (*stemflow*) et des écoulements distribués par égouttage par les débordement du feuillage (*throughflow*) (Sansoulet, 2004 ; Bassette, 2004 ; Bussière *et al.*, soumis). En fonction de la localisation des engrais, souvent apportés au pied des bananiers, les pertes par ruissellement et lixiviation peuvent être aggravées par ce fonctionnement hydrologique distribué, et conditionner en retour le raisonnement des apports d'engrais.

I.2.2.2 L'absorption de l'azote par la plante

Les travaux des physiologistes (Montagut et Martin-Prével, 1965 ; Martin Prével et Montagut, 1966) ont montré que le prélèvement des éléments minéraux par le bananier est plus élevé durant le premier cycle de culture. Pour les cycles suivants, les besoins nutritifs « globaux » des rejets en croissance (Fig.3) sont identiques à ceux de la plante en premier cycle, mais pourraient être comblés par d'autres sources autre que le sol, notamment par les transferts d'azote de la plante mère vers le rejet et par les restitutions des résidus de culture. Feller *et al.* (1986) et Chotte *et al.* (1994) soulignent à ce titre que dans les sols tropicaux pauvres en matière organique, une part prépondérante de l'azote biodisponible provient de la minéralisation du pool organique du sol alimenté par les résidus de culture. En règle générale on estime ainsi, que les deux tiers de l'azote de la plante proviennent de la matière organique du sol, le tiers restant étant fourni par l'engrais.

Montagut et Martin-Prével (1965) et Martin Prével et Montagut (1966) montrent par ailleurs, à partir des bilans comparés d'azote et de matière sèche, que le bulbe (organe de stockage chez certains végétaux) ne contient jamais plus de 15% de l'azote du bananier, et ainsi ne joue à aucun moment de la vie végétative le rôle de réserve d'azote dans laquelle s'accumuleraient des excédents que les organes aériens pourraient puiser. Ainsi, l'absorption d'azote chez le bananier est strictement proportionnelle à ses besoins en croissance durant le cycle. L'absorption est également conditionnée par les modalités de prospection racinaire du bananier, avec 90 % des racines qui s'étendent latéralement jusqu'à un mètre de la plante et 70% de la biomasse racinaire totale confinée dans les 20-40 premiers centimètres du sol (Champion et Sioussaram, 1970 ; Lassoudière, 1978 ; Lecompte *et al.*, 2001 ; Lecompte, *et al.*, 2002). Cet enracinement superficiel à développement latéral serait propice à la valorisation des nutriments issus de la décomposition des résidus de cultures placés dans les

inter-rangs des parcelles, mais serait incapable d'absorber les nitrates lessivés à plus de 60 centimètres.

I.2.2.3 La décomposition des résidus de culture

Le schéma de la figure 5 présente les principales transformations du carbone et de l'azote associées aux transformations de la matière organique des résidus de cultures.

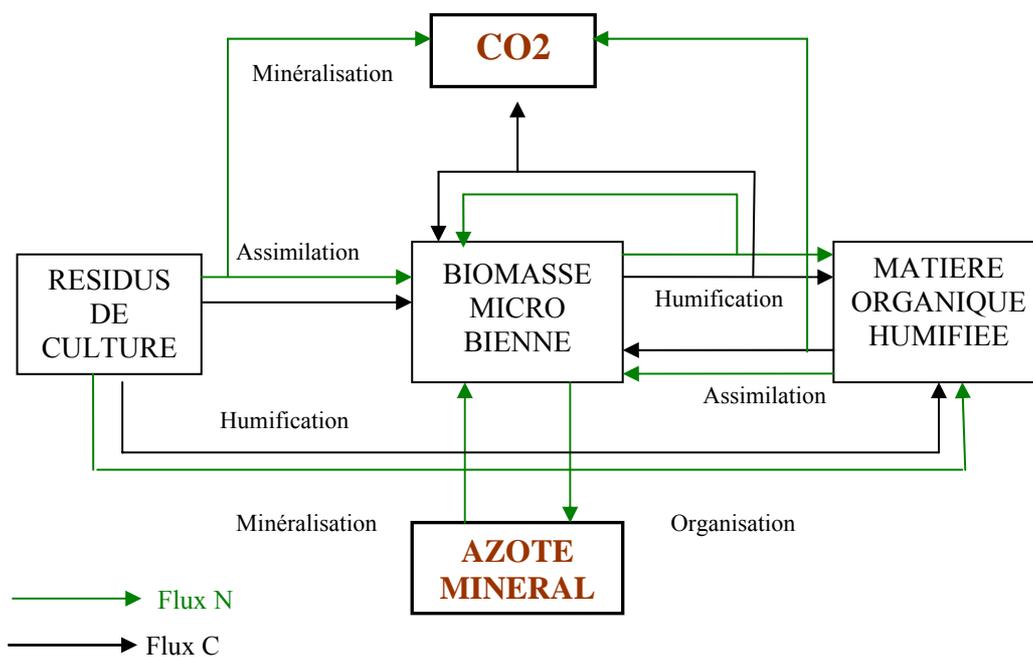


Figure 5. Schéma des principales transformations du carbone et de l'azote du sol associées aux transformations de la matière organique (d'après Nicolardot, 2001)

La décomposition des résidus consiste en une simplification moléculaire. Outre les molécules intactes qui restent dans le sol, une partie du carbone organique est, en conditions aérobies, minéralisé sous forme de CO₂. Parallèlement, une autre partie est transitoirement incorporée à la biomasse microbienne, qui fait l'objet elle aussi de dégradation. Enfin, une dernière fraction est progressivement stockée sous forme de matière organique stable, soit non décomposée, soit après décomposition. L'azote associé au carbone dans les molécules organiques est, quant à lui, ammonifié et nitrifié, une fraction de cet azote minéral pouvant être assimilée par les microorganismes pour leur croissance : il s'agit de l'organisation (immobilisation en terme anglo-saxon). La faible disponibilité de l'azote dans le sol peut prolonger cette phase d'organisation et limiter la libération d'azote minéral lors de la dégradation des résidus (Recous *et al.*, 1995).

Les besoins de la culture bananière sont estimés globalement à 200 kg N.ha⁻¹ an⁻¹ alors que les exportations (régime récolté) ne représentent que 60 kg N. ha⁻¹ an⁻¹. Ainsi, les exportations

d'azote ne concernent que 30% de l'azote total de la plante à la récolte et les 70% de l'azote de la plante présents sous forme de résidus sont restitués au sol (Godefroy, 1975), constituant une réserve probablement contributive à l'alimentation des cycles suivants.

La décomposition des résidus de cultures bananières a été peu étudiée, mais les quelques travaux existants attestent d'une vitesse de décomposition rapide. Les travaux de Godefroy (1975) en Côte d'Ivoire sur sol ferrallitique montrent que 86% des résidus de bananier sont décomposés dans les deux mois suivant l'apport. Un an après, il ne reste plus que 0.6 % des résidus à la surface du sol. Lekasi *et al.* (1999) et Lekasi *et al.* (2001) montrent par ailleurs (i) que les feuilles du bananier (C/N de 18,36 ; N/lignine de 0,16 et C/N/lignine de 1,07) sont décomposés à hauteur de 50 % en 60 jours en présence de macrofaune et en 169 jours en absence de macrofaune et que (ii) les pseudotroncs du bananier (C/N de 53.46, N/lignine de 0.08 et C/N/lignine de 4.24) sont décomposés à hauteur de 50 % en 33 jours en présence de macrofaune et en 83 jours en absence de macrofaune. Ainsi d'après ces travaux, les pseudotroncs montrent une vitesse de décomposition plus élevée que celle des feuilles.

En revanche, on ne dispose d'aucune étude portant sur l'effet des caractéristiques biochimiques en relation avec la cinétique potentielle de décomposition des résidus de bananiers, c'est-à-dire la vitesse de décomposition et la proportion de composés susceptibles de diffuser vers le sol, bien que ces effets aient été mis en évidence pour d'autres cultures (Trinsoutrot, 2000 ; Abiven, 2001 ; Abiven 2005 ; Bertrand, 2004).

À partir du 2^{ème} cycle de culture, la culture bananière s'apparente à un système de culture sous couverture végétale (mulch de résidus), c'est-à-dire à un système sans travail du sol associé à une dynamique de l'activité biologique des sols inféodée à une couverture permanente. A l'aide du modèle CENTURY, Woome *et al.* (1998) ont montré que les restitutions de résidus de cultures bananières ajoutés à des résidus de napier associé (*Pennisetum purpureum*) pouvaient faire passer les teneurs en matière organique du sol de 14 à 24 t.ha⁻¹ en 10 ans. La présence de mulch de résidus à la surface du sol des bananeraies situées en zone tropicale humide peut en plus de la fourniture en nutriments au système, jouer un rôle de protection permanente du sol. Khamsouk (2001) et Cattan *et al.* (2005) montrent que cette couverture végétale contribue à l'atténuation du ruissellement et de l'érosion des sols.

I.2.2.4 Lixiviation et ruissellement en milieu tropical humide

Les sols ferrugineux tropicaux sont soumis à des pluies de forte intensités qui sont vecteurs de ruissellement, de drainage et d'érosion et donc de déperdition des éléments nutritifs présents dans le sol ou apportés par les engrais. Les risques importants de pertes en nitrates par

lixiviation et ruissellement sous bananeraie ont été évalués sur différents types de sol en zone tropicale (vertisol, sol brun, sol ferrallitique, andosol) (Roose, 1968 ; Godefroy et Marin 1969 ; Godefroy et Guillemot 1975 ; Godefroy *et al.*, 1983 ; Godefroy *et al.*, 1989 ; Yao, 1989 ; Godefroy et Dormoy 1990). Pour les sols bruns à halloysite, les auteurs montrent que pour un apport de l'ordre de $400 \text{ kg N. ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, les pertes en azote estimées par ruissellement et drainage seraient comprises entre $200 \text{ kg N ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ et $300 \text{ kg N ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Ces pertes importantes seraient essentiellement liées à la redistribution de la pluie par le couvert, puisqu'il y a une multiplication par 20 de la valeur et de l'intensité de la pluie sur une surface équivalente à la base du faux tronc (Bussière *et al.*, soumis), où sont apportés les engrais en couronne. L'écoulement localisé mais vigoureux de la pluie le long du pseudotrunc au cours d'une partie du cycle, est capable d'entraîner des agrégats millimétriques, et des solutés adsorbables loin de leur position initiale (Gouyer, 2001). Cattan *et al.* (2005) montrent ainsi qu'au sein d'une bananeraie bien couvrante et pour une infiltrabilité du sol de 30 mm/h , 60% des pluies sont en mesure de provoquer du ruissellement. Ces valeurs évoluent au cours du cycle puisque l'interception de la pluie augmente avec l'indice de surface foliaire au cours du développement de la culture. Ainsi, pour des parcelles de bananier de la variété « Grande naine », plantées avec une densité de $1800 \text{ plants ha}^{-1}$, les hauteurs d'eau du *stemflow* peuvent représenter jusqu'à 52 fois la pluie incidente, avant le stade de floraison des bananiers et jusqu'à 82 fois la pluie incidente au stade de fructification (Nouvellon, 1999 ; Cattan *et al.*, 2005).

Il convient de noter par ailleurs que les travaux de Sansoulet (2004) montrent que les sols à allophanes à charges variables peuvent retenir les nitrates dans les horizons sous-superficiels et ainsi limiter les pertes d'azote par lixiviation (30% de l'apport d'engrais) alors que les pertes de potassium étaient de l'ordre de 70% de l'apport. Bien que ces propriétés n'aient pas été démontrées dans le cas des sols bruns à halloysite expérimentés dans ce travail, la présence importante d'oxyhydroxydes en profondeur (Khamssouk, 2001) suppose l'existence de tels processus.

I.2.2.5 Minéralisation de la matière organique du sol

Les quantités d'azote minéralisées annuellement peuvent varier de quelques dizaines à plus de 150 kg N.ha^{-1} dans les sols tropicaux (Bonzi, 2002). Elles correspondent à des taux annuels de minéralisation compris entre 0,7 à 2 % selon les sols (Remy et Marin-Laflèche, 1976).

Bien que la diminution de la plupart de la matière organique labile soit rapide, la majorité (80%) de la matière organique ($< 200 \mu\text{m}$) se dégrade lentement.

Sierra et Marban (2000) ont montré que pour un sol ferrallitique incubé à différentes températures, la minéralisation augmente avec la température notamment à partir de 30°C et qu'elle persiste même à 50°C. Des températures supérieures à 30°C sont fréquemment observées dans les dix premiers centimètres du sol en saison sèche d'après les travaux de Bussière et Cellier (1994). Ces observations concordent avec l'idée généralement admise de l'effet stimulateur de la température sur la minéralisation en conditions tropicales. Cependant la nitrification ne suit pas exactement la même tendance et présente un optimum à 40°C, ce qui entraîne une persistance des ions NH_4^+ dans le sol pour toute la gamme de température observée dans les sols tropicaux acides (Sierra et Marban, 2000).

La phase de nitrification qui est souvent rapide en milieu tempéré, justifie que l'on puisse regrouper les deux mécanismes et assimiler l'azote disponible pour la plante à la seule forme nitrique. En conditions de sol acide, comme dans le cas du sol brun rouille à halloysite étudié dans ces essais, la phase de nitrification plus lente impose la limitation de cette hypothèse et la prise en compte de la nitrification (Sierra *et al.*, 2003). Dans ce travail, la minéralisation a été de 50 kg N.ha⁻¹ en 3 mois dans un sol ferrallitique nu et de 25 kg N.ha⁻¹ sous culture de maïs. Les travaux de Feller *et al.* (1986) montrant que les deux tiers de l'azote de la plante proviendraient de la minéralisation de la matière organique du sol sont donc en contradiction avec les estimations des besoins et des fournitures du sol estimés par Sierra et Marban (2000).

I.2.2.6 Volatilisation

Les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac sont étroitement liées aux conditions du sol (pH, capacité d'échange ou CEC, porosité), à son humidité (concentration de la solution du sol) et aux conditions climatiques (pluviométrie, température, condition de diffusion vers l'atmosphère) (Sommer *et al.*, 1991). Elles peuvent aller de quelques % à 90% de l'azote ammoniacal apporté lors des épandages de lisier, et sont plus faibles, jusqu'à 50% pour les apports d'engrais minéraux (Lauer *et al.*, 1976 ; Sommer *et al.*, 1991 ; Moal *et al.*, 1995). Ces émissions se produisent principalement dans les quelques jours qui suivent les apports.

Dans les sols tropicaux acides, les pertes par volatilisation d'ammoniac sont limitées. Les travaux de Sierra *et al.* (2001) montrent qu'après un épandage de fumure (600 kg N.ha⁻¹) sur un sol ferrallitique de pH 4.9, il n'y a pas de volatilisation pour la fumure enfouie et que pour celle restée à la surface seulement 0.5% de l'azote apporté est volatilisé. Les auteurs expliquent que le faible taux de volatilisation des fumures est lié à l'humidité du sol qui induit un transfert rapide de l'azote dans le profil et surtout au faible pH du sol qui n'est pas

favorable à ce processus malgré la forte concentration de NH_4^+ à la surface du sol. Seules les particules de fumure restées à la surface pourraient alors contribuer à la volatilisation.

Par ailleurs, Bonzi (2002) établit des relations entre les propriétés du sol et les pertes d'azote par volatilisation, et montre que pour un taux d'argile supérieur à 30%, une CEC supérieure à $5 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, et un pourcentage de MOS supérieur à 1.5, les pertes par volatilisation sont très faibles.

I.2.2.7 **Dénitrification**

Les microorganismes dénitrifiants entrent en compétition avec les cultures pour l'utilisation des nitrates, ce qui peut représenter une perte de N considérable atteignant 30% dans certains agrosystèmes (Hauck, 1981). La production des gaz (N_2O , NO_x) de la dénitrification peut être considérée comme faible en cultures bananières sur sol acide car les conditions favorables à cette activité des microorganismes ne se retrouvent pas aux mêmes horizons du sol : anoxie (peu existante ou sinon en profondeur), présence de nitrates et de carbone métabolisable (en surface). Bonzi (2002) montrent à partir d'incubation en laboratoire un faible potentiel de dénitrification pour des sols ferrugineux tropicaux acide ayant des propriétés proches de celle des sols brun à halloysite.

Les besoins en azote du bananier sont plutôt connus. Les flux d'entrées et de sorties sont très importants et des éventuels changements rapides de l'azote biodisponible au cours du cycle sont possibles. Ceci explique les motivations d'une gestion de la fertilisation par le SCP. Cependant les apports d'engrais semblent exagérés par rapport aux besoins du système puisqu'il y a des restitutions d'azote *via* la décomposition des résidus de cultures qui ne sont pas pris en compte. Pour améliorer les prédictions de fertilisation, il convient donc de déterminer de façon précise les différents termes prépondérants du bilan de l'azote dans les systèmes de cultures bananières sur sol acide en climat tropical humide.

I.3 OBJECTIFS ET STRATEGIE DE RECHERCHE

I.3.1 Objectifs scientifiques

L'objectif général de cette thèse procède de l'analyse et de la quantification du bilan de l'azote biodisponible au sein de deux cycles contrastés d'une bananeraie sur sol brun à halloysite en milieu tropical humide, en vue de dégager des perspectives pour une meilleure gestion de la fertilisation azotée dans ces systèmes de culture.

Les objectifs scientifiques sont au nombre de trois :

- évaluer les processus affectant l'efficacité de l'engrais en tenant compte de la variation des autres sources d'azote disponible (sol et résidus),
- caractériser et modéliser la décomposition des résidus de bananier et leur capacité à fournir de l'azote à la culture,
- estimer l'effet de la redistribution de la pluie par le couvert végétal sur les pertes d'azote par lessivage.

Au-delà de l'analyse du bilan global annuel, il était important de pouvoir étudier l'évolution temporelle des différents termes du bilan au cours du cycle afin d'évaluer les éventuelles interactions (par exemple absorption/lessivage) et ainsi acquérir une vision dynamique des déterminismes de la teneur en azote biodisponible.

I.3.2 Hypothèses de recherche

En référence à l'analyse bibliographique et aux connaissances disponibles, les objectifs énoncés sont sous-tendus par trois hypothèses principales :

- **H1 : L'absorption en azote de la culture varie en fonction du cycle cultural.**

Les travaux menés jusqu'ici concernant les besoins en azote du bananier portaient essentiellement sur les cultures de 2 ans et plus ; les quelques études portant sur les premiers cycles ont concernés les rejets « baïonnettes » à savoir des rejets sélectionnés au pieds de bananiers de cycles plus avancés (il s'agit d'une forme de repiquage). Cette technique culturale tend à disparaître au profit de l'utilisation de vitroplants, qui limite fortement les risques sanitaires (infestation de nématodes), et donc l'utilisation des pesticides.

L'hypothèse posée dans cette étude considère que lors du premier cycle cultural (à partir de vitroplant), l'absorption d'azote serait plus élevée que celles des cycles suivants qui

bénéficient des transferts d'azote du pied mère avant la récolte. L'absorption d'azote du bananier serait donc susceptible de varier en fonction du cycle cultural même si les teneurs totales à la récolte restent similaires.

➤ **H2 : L'azote provenant des résidus de récolte contribue à l'alimentation azotée de la culture suivante.**

Certains travaux ont montré que le maintien des résidus de culture pendant l'interculture permettait une augmentation des rendements de la culture suivante. Dans le cas de la culture bananière semi-pérenne, la décomposition des résidus a lieu pendant la croissance de la culture suivante.

Ainsi, la deuxième hypothèse posée dans cette étude est que les importantes quantités de résidus de culture laissés à la surface de l'inter-rang à la récolte pourraient être minéralisés et fournir une part de l'alimentation azotée de la culture en place. D'autant plus que grâce aux nouvelles techniques culturales d'« oeillement précoce », la culture en place atteint sa vitesse maximum d'absorption (différenciation florale) au moment de la restitution des résidus du cycle précédent.

➤ **H3 : La redistribution de la pluie par le bananier affecte fortement les pertes de nitrates par lessivage.**

Bien que quelques études aient montré l'influence de la redistribution de la pluie par le bananier sur les flux de drainage et de ruissellement à l'échelle de la plante, aucune étude à ce jour ne s'est intéressée à l'impact de ce phénomène sur les flux de nitrates sur l'ensemble du cycle de la bananeraie.

Ainsi, la dernière hypothèse de cette étude est que les flux d'eau hétérogènes générés par la redistribution de la pluie par le couvert créeraient une hétérogénéité spatiale (rang/inter-rangs) des pertes d'azote du fait de l'entraînement de l'azote minéral par les flux de drainage.

De plus, les pertes globales sur un cycle seraient contrastées (volume total en fonction de la position dans le rang) entre un premier cycle (à partir de vitroplants) et les cycles suivants, où les résidus de culture sont présents dans l'inter-rang.

Dans notre système sol-plante, les processus impliqués dans la **volatilisation** et la **dénitrification** ne seront pas traités car ils sont jugés négligeables. Il est en effet admis que l'engrais apporté sous forme uréique est incorporé rapidement au sol (en saison humide du fait de l'importante teneur en eau du sol, d'une part, et en saison sèche, d'autre part, du fait du maintien de cette humidité par l'irrigation). L'engrais ne resterait pas assez longtemps à la surface, ni à une concentration suffisante pour être volatilisé en grande quantité. Les travaux

de Sierra *et al.* (2001) sur un sol similaire au sol brun rouille à halloysite, objet de cette étude, et les relations établies par Bonzi (2002) sont en faveur de cette hypothèse.

De plus, le pH acide du sol expérimenté dans ces travaux n'est pas favorable à ce processus. La dénitrification devrait être quasi inexistante à cause de la perméabilité de ces sols qui ne permet pas le développement de l'anoxie.

Si ces hypothèses se vérifient, ce travail pourrait contribuer à démontrer qu'en l'absence de prise en compte de la dynamique d'absorption de l'azote par la culture et des autres entrées d'azote (résidus et sol) dans le système cultivé, la fertilisation raisonnée sur les bases du SCP surestimerait les quantités d'azote à apporter par rapport aux besoins de la culture. L'efficacité de l'engrais serait donc limitée.

I.3.3 Démarche générale

La démarche générale adoptée est résumée dans la figure 6. Elle décrit les principales étapes retenues pour l'analyse du bilan de l'azote en bananeraies.

Dans cette étude, la méthode adoptée pour estimer le bilan d'azote combine (i) une estimation des flux d'azote en bananeraie sur deux cycles contrastés (bananeraie nouvellement plantée et bananeraie établie) ce qui équivaut à une estimation pluriannuelle des flux et (ii) une estimation des flux à travers une dilution isotopique de l'azote de l'engrais (engrais marqué à l'azote 15). Le terme contrasté est employé ici car les bilans d'azote sont supposés très différents entre ces 2 moments du cycle de la culture bananière.

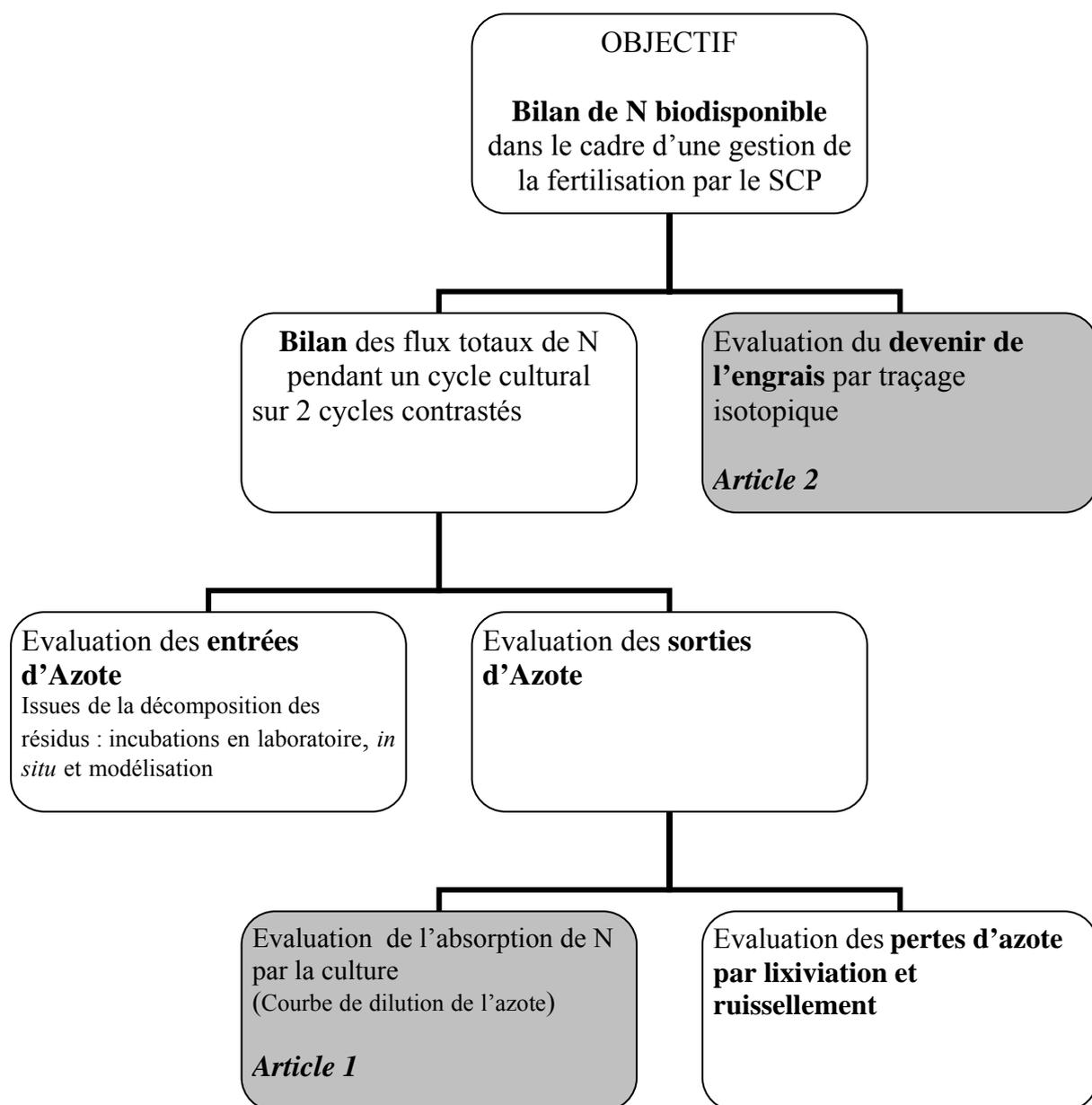


Figure 6. Schéma de la démarche générale adoptée pour ces travaux de thèse

Les flux évalués par mesure directe concernent l'entrée d'azote dans le système par la minéralisation des résidus, et les sorties d'azote par absorption de la culture et, par lixiviation et ruissellement. La minéralisation de la matière organique du sol non mesurée de façon directe devrait être à l'origine du défaut de bilan puisque la volatilisation et la dénitrification sont considérées comme négligeables dans nos conditions pédoclimatiques.

Dans le cadre de la stratégie de l'étude, nous avons choisi d'aborder la modélisation (i) de la minéralisation des résidus de culture et (ii) de l'absorption d'azote par la culture au cours du cycle. Pour ce faire, le sous module de décomposition de résidus de STICS simulant de façon satisfaisante la décomposition d'une gamme très large de résidus de culture (Nicolardot *et al.*, 2001) a été évalué pour prédire la décomposition des résidus de bananier. La modélisation de l'absorption de l'azote par la culture bananière a été réalisée en déterminant la courbe critique de dilution de l'azote pour les deux cycles contrastés de cette culture. Les courbes obtenues ont été comparées avec la courbe critique générale de dilution de l'azote proposée par Greenwood (1990) pour les plantes en C3. Ces travaux ont fait l'objet de l'article 1 présentés synthétisés au chapitre II.1.

Par ailleurs, le devenir de l'engrais a été étudié en deux parties : une première expérimentation a consisté à comparer l'efficacité de l'engrais en fonction des dates d'apport (différenciation florale, floraison), et une seconde expérimentation a consisté à évaluer l'effet du cycle cultural. Les résultats de cette partie ont fait l'objet de l'article 2 présentés synthétisés au chapitre II.2.

L'originalité méthodologique de ces travaux réside dans le couplage de différentes méthodes de mesures biologiques et physiques et de la modélisation de certains des processus étudiés. En effet, dans la plupart des travaux retrouvés dans la bibliographie un terme unique du bilan azoté voire deux sont mesurés, car les méthodes de mesures des termes du bilan sur le terrain sont relativement lourdes (lysimètres, cases de ruissellement, tunnels de mesures de volatilisation, etc...). Dans ces travaux, la quantification des termes du bilan (absorption, lessivage et ruissellement) a été réalisée à partir de méthodes d'études classiques utilisées sur grandes cultures qui ont été adaptées à la culture du bananier. Les adaptations concernent essentiellement (i) la mesure de la dynamique d'absorption de l'azote par sous échantillonnage des plantes du fait de leur grande taille, (ii) la mesure des flux sortants d'azote par ruissellement à partir de placette de taille définie (cases de ruissellement), adaptée à la densité de plantation et aux conditions climatiques (Khamsouk, 2001) et (iii) la mesure des flux sortants d'azote par lixiviation à partir de lysimètres placés à différentes positions sur la parcelle (rang, inter-rangs) pour tenir compte de l'hétérogénéité de la redistribution de la pluie

par le couvert. L'emploi de l'azote 15, isotope stable, est une technique qui a été utilisée afin d'accéder (i) aux processus élémentaires du cycle interne de l'azote qui peuvent interférer avec le devenir de l'engrais (Mary et Recous, 1994; Recous *et al.*, 1996), et (ii) au devenir précis des résidus de culture dans le système sol-plante.

II LES TERMES DU BILAN D'AZOTE : DEMARCHE ET PRINCIPAUX RESULTATS

11.1 SITE EXPERIMENTAL

11.1.1 Caractéristiques générales

La Martinique fait partie de l'archipel des Petites Antilles et est située à 14,4° de latitude nord et 61,5° de latitude ouest (à 6.858 km de l'Europe). Cette île (1.128 km²) est caractérisée par une grande diversité de situations pédologiques (Fig.7) et climatiques qui conditionnent l'itinéraire technique de la culture bananière. La majorité des exploitations bananières est localisée sur andosol (nord de l'île) et sur nitisol appelé localement sol brun rouille à halloysite (centre et est de l'île), ces derniers sols représentant 23 % des sols trouvés en zone tropicale (Sanchez et Logan, 2002)

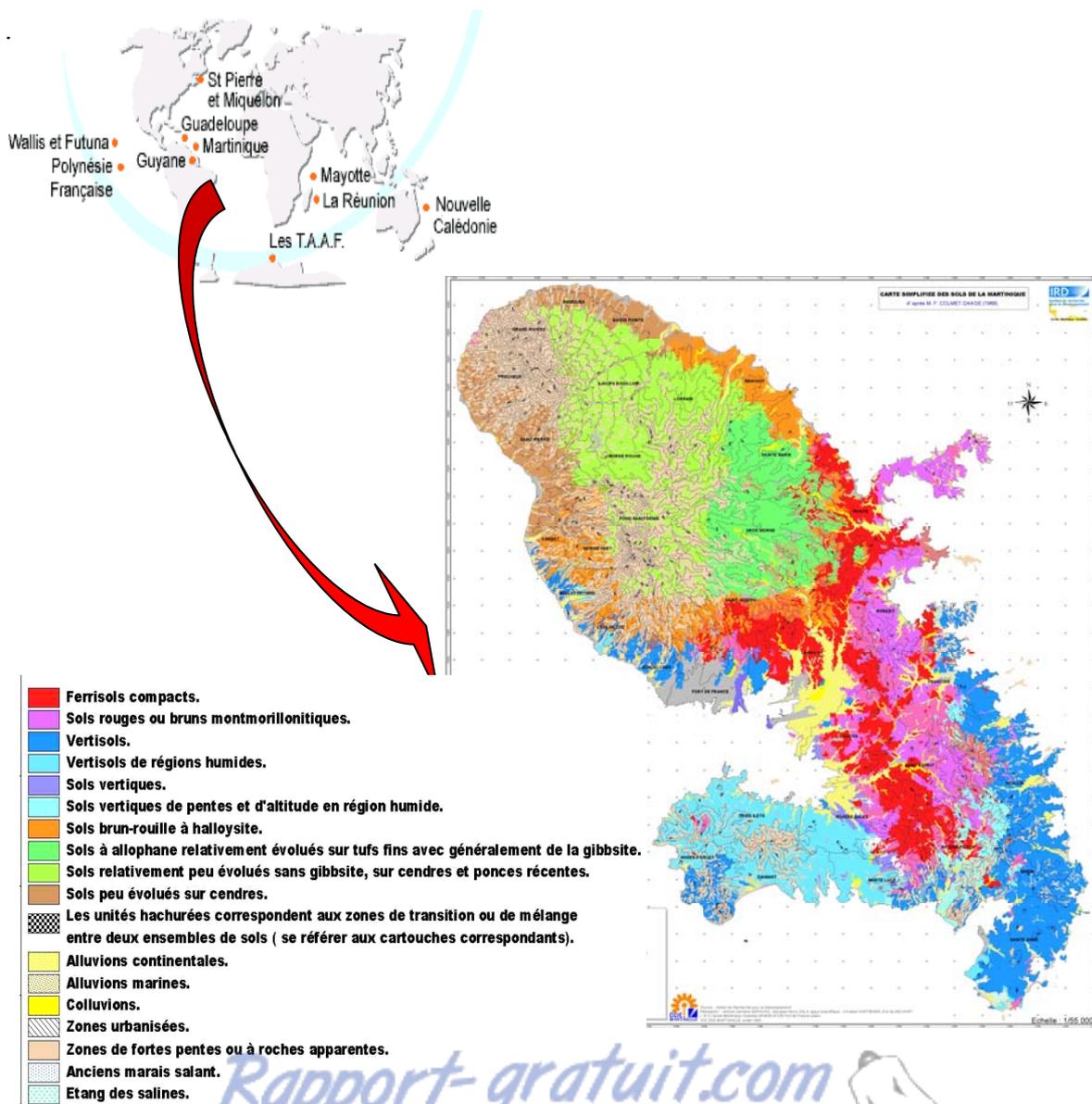


Figure 7. Carte pédologique de la Martinique (Source IRD Martinique)

La pluviosité annuelle moyenne est comprise entre 2000 et 2500 mm et la température moyenne annuelle est de 26°C. Deux saisons se succèdent au cours de l'année. La saison sèche s'étend de janvier à juin avec une pluviosité mensuelle de 96 à 198 mm et des températures moyennes mensuelles de 24 à 26°C. La saison humide s'étend de juillet à décembre avec des pluies de 232 à 328 mm et des températures moyennes mensuelles de 26°C. La pluviométrie et la température de l'air au cours des cycles culturaux 2003-2004 sont représentées sur la figure 8.

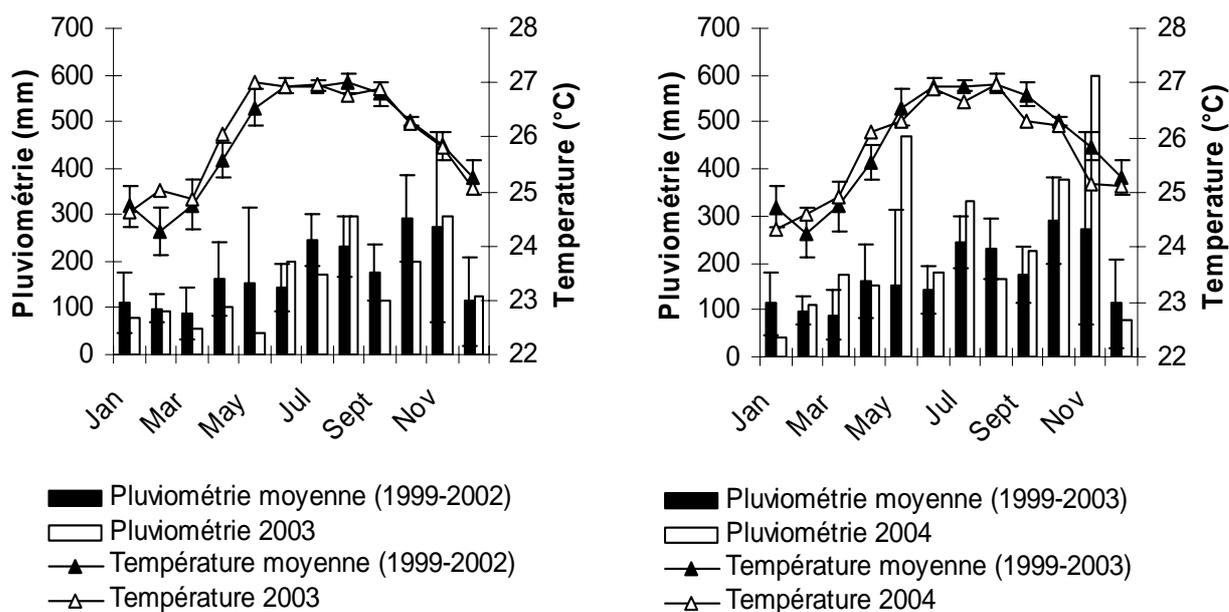


Figure 8. Pluviométrie et température mensuelles des années 2003 et 2004 au Lamentin (Rivière Lézarde)

Dans le cadre de cette étude, tous les essais au champ ont été réalisés à la station de Rivière Lézarde dans l'exploitation bananière de Ponterre (appartenant au CIRAD) qui se trouve dans la région centrale de l'île de la Martinique sur sol brun rouille à halloysite. La superficie totale de la station est de 110 ha dont 61 ha sont cultivés en banane.

Cinq placettes de 200m², avec une pente de 10% (altitude 200m), ont été délimitées afin de comparer le devenir de l'azote au cours de deux cycles culturaux contrastés (1^{er} cycle et 4^{ème} cycle de culture), et d'étudier l'apport en azote des résidus de culture en second cycle cultural (4 placettes dont celle du 1^{er} cycle précité).

L'obtention du traitement Ban1 (1^{er} cycle) (Fig.9A) résulte de l'itinéraire technique suivant : coupe des bananiers du cycle précédent à la base du pseudotrunc - les bulbes étant piqués au glyphosate et les résidus de la parcelle enlevés du sol -, suivi d'une jachère de trois mois précédant la plantation des vitroplants sur sol non travaillé. Le traitement Ban4 (Fig.9B) est représentatif des cycles 2 à 5. Les bananiers du cycle 3 ont été recépés (coupe des pieds mères

à un moment autre que la récolte) pour permettre la levée de la dormance imposée par le pied mère et donc le démarrage des rejets en 4^{ème} cycle. Les rejets (Ban4) débutent donc leur croissance de façon relativement synchrone avec les vitroplants (Ban1).

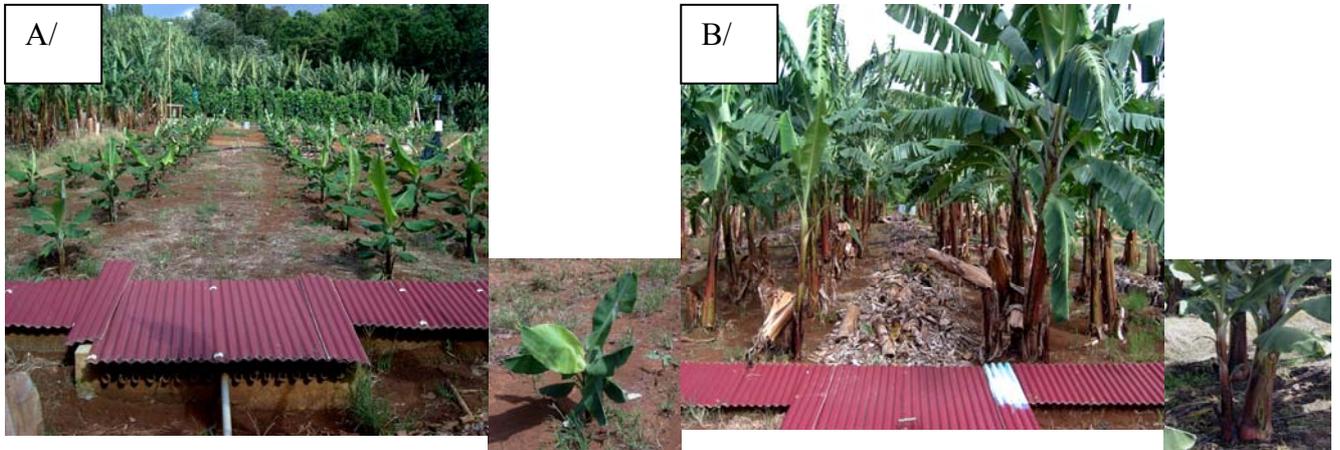


Figure 9. Placettes expérimentales de bananeraie en premier cycle cultural (A) avec un départ de végétation à partir de vitroplants : traitement Ban1, et de bananeraie en quatrième cycle cultural (B) avec un départ de végétation à partir d'un rejet sélectionné : traitement Ban4¹

Les bananiers (BAR) sont plantés en double rang comme représenté sur la figure 10. La distance entre deux rangs est de 1,80 m (petit inter-rang, PIR) et de 3,60 m pour le grand inter-rang (GIR).

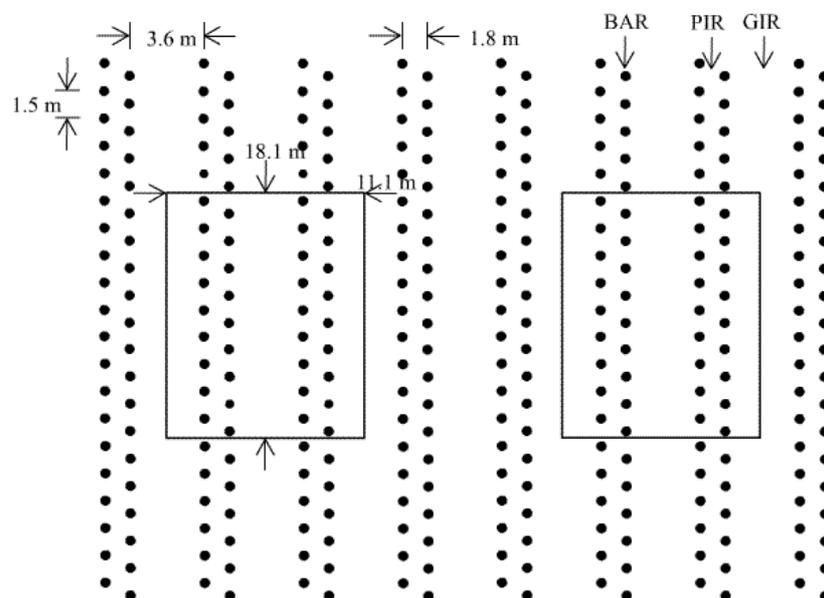


Figure 10. Schéma des placettes expérimentales plantées en double ligne

Ce type de plantation en double rang est conforme avec les pratiques de la plupart des agriculteurs en Martinique et facilite les soins au pied du bananier (épandage des fertilisants et

¹ Cette dernière photo a été prise environ 3 mois après le recépage

des pesticides en couronne au pied de la plante). Il est caractérisé par ailleurs par une disposition des résidus de culture dans le GIR.

Les apports de fertilisants au cours du cycle de culture ont été de : 372,6 Kg N.ha⁻¹, 120 Kg Ca.ha⁻¹, 80 Kg Mg.ha⁻¹, 150 Kg P.ha⁻¹, 120 Kg K.ha⁻¹. Ils ont été fractionnés en fonction de la pluviométrie (SCP de 200 mm en sol brun à halloysite). L'itinéraire technique des parcelles est récapitulé dans le tableau 1.

Les stades clés ayant fait l'objet de mesures sont également présentés dans le tableau 1. La plantation des cultures a été réalisée en fin de saison sèche le 28/05/03, l'essentiel du cycle se déroule donc en saison humide. Pour permettre le démarrage de la culture, l'irrigation sur frondaison a été déclenchée durant 15 jours après la plantation (jusqu'au 12/06/05) pour un volume total de 40 mm.

Tableau 1. Précédent cultural et itinéraire technique des parcelles expérimentales
JAP signifie jours après plantation, JAR signifie jours après recépage.

Traitement	1er cycle cultural (Ban1)	4eme cycle cultural (Ban4)
Caractéristiques		
Cultivar	Grande naine	Grande naine
Début de végétation		
Origine	Vitroplants	Rejets après recépage
Date	28/05/2003	18/06/2003
Cultures précédentes	Banane (2000-2002) – Ananas (1998-2000)	Banane (2000-2002) – Banane (1998-2000)
Précédent devenir des résidus de récolte	3 ans de restitution des résidus Dernier résidus de culture enlevés	4 ans de restitution des résidus
Stades clés		
Plantation	26/05/2003 (0 JAP)	18/06/2003 (0 JAR)
6 feuilles	17/07/2003 (52 JAP)	17/07/2003 (25 JAR)
12-14 feuilles ou différenciation florale	04/09/2003 (101 JAP)	04/09/2003 (78 JAR)
Floraison (mi-floraison)	15/10/2003 (142 JAP)	15/10/2003 (119 JAR)
Récolte 1 (mi-récolte)	16/01/2004 (235 JAP)	16/01/2004 (212 JAR)
Récolte 2 (mi-récolte)	19/08/2004	19/08/2004

Une station météo Campbell installée dans la parcelle expérimentale a permis l'enregistrement horaire des conditions météorologiques locales (pluie, température, rayonnement). L'ETP a été calculée à partir des données de rayonnement mesurées par la station météo Campbell du CIRAD d'après la relation définie par Meyer et Schoch (1976) :

$$ETP \text{ (mm)} = 0,2392 * \text{Ray (MJ/m}^2) - 0,0026.$$

Sur chaque parcelle, suivant la ligne de la plus grande pente, sont disposés 27 tensiomètres pour permettre l'estimation de l'humidité pondérale, et les mouvements d'eau du

sol. Trois tensiomètres ont été placés sous bananier (BAR), 3 dans le petit inter-rang (PIR) et 3 dans le grand inter-rang (GIR) à chaque profondeur 30, 60, 120, et 200 cm de profondeur. Les tensiomètres ont été relevés 2 fois par semaine. Ces relevés ont été réalisés à l'aide d'un tensiomètre électronique à aiguille hypodermique. Afin d'éviter des perturbations de l'appareil par l'humidité, les bouchons des tensiomètres ont été essuyés soigneusement avant leur lecture.

Les résultats des analyses de racines préalables aux essais ont mis en évidence la nécessité de traiter les parcelles contre les nématodes avant la plantation. Au cours de la culture, tous les 3 mois, des analyses de racines ont permis de vérifier l'état sanitaire des parcelles vis-à-vis des nématodes et d'appliquer en temps utile les traitements adéquats. Des pièges à charançons ont été mis en place sur les parcelles à titre préventif. Ces précautions ont permis de maintenir un état sanitaire des parcelles non préjudiciable à la croissance de la culture.

Les mesures de circonférence des bananiers à l'intérieur et à l'extérieur des cases de ruissellement ne révèlent pas de différences significatives ($p < 0,05$) entre ces 2 positions. Les prélèvements des bananiers pourront donc se réaliser en bordure des placettes qui par ailleurs ont le même itinéraire technique. Ces précautions permettent de ne pas perturber l'état de la surface du sol des cases de ruissellement (délimitant les placettes) et de maintenir à ce niveau une population homogène de bananiers. De même, la zone où ont été placés les lysimètres (haut des placettes) correspond à une zone où les bananiers peuvent être considérés comme appartenant à la même population que ceux dans la case de ruissellement ($p < 0,05$).

II.1.2 Le sol brun rouille à halloysite

Les nitisol (FAO, 1992), appelés localement sols bruns rouille à halloysite (Colmet-Daage et Lagache, 1965) sont des sols apparentés aux sols peu évolués à allophane. Ces deux types de sols sont issus de projections volcaniques de cendres ou ponces perméables mais les sols à allophane sont situés dans des régions plus humides, tandis que la saison sèche plus marquée au centre de l'île, provoque une transformation irréversible des allophanes en argiles 1/1 (halloysite ou kaolinite hydratée) par une alternance de cycle humectation-dessiccation et permet la formation des sols bruns.

La description du profil (Tab.2) d'une placette de la station de RLZ a été réalisée par Cocu (1999) à partir d'une fosse ouverte jusqu'à 1,80 m. Globalement, 2 grandes unités se distinguent : les horizons cultivés et les horizons structuraux en profondeur. Les horizons cultivés sont caractérisés par un développement racinaire important (jusqu'à 60 cm de profondeur), une couleur brun foncée (0 à 35 cm de profondeur), un pH acide (sauf horizon de

surface chaulé) et une texture argileuse. Les horizons profonds sont caractérisés par une structure plus massive et compacte. Selon Colmet-Daage et Lagache (1965), il y a en profondeur, 2 roches mères caractérisées pour la première par des taches et des recouvrements de fer et de manganèse traduisant des hydromorphies temporaires de pente ; et pour la deuxième par une compacité accrue et des taches rouilles, interprétées comme le produit de l'altération de projections grossières. Selon Roose (1999), ce sol cultivé en banane comporte donc des zones hétérogènes en surface qui ont des capacités d'infiltration spécifiques. En profondeur (60 cm), le niveau argileux semble limiter l'infiltration qui augmente après la discontinuité.

Tableau 2. Profil de sol brun rouille à halloysite sous banane à l'Habitation Rivière lézarde (CIRAD) par Cocu (1999)



Z (cm)	N° Horizon L: limites	Couleur Munsell	Hum* terrain	pH terrain	Texture** terrain	Structure Consistance	Porosité R : Racines
0	N°1 : 0-6 L interrompue nette	7,5YR2/2	Frais	7	L	Polyédrique subangulaire Peu compact Friable	Poreux R: nombreuses très fines, régulières Peu poreux R: nombreuses très fines, régulières Peu poreux R: peu nombreuses Très peu poreux R: absentes
6	N°2 : 6-35 L ondulée distincte	7,5YR3/4	Frais	4	LA		
35	N°3 : 35-59 L ondulée nette	7,5YR4/4	Frais	4,5	AL	20-50 % tâches noires Fe-Mn (Hydromorphie)	Peu poreux R: absentes
59	N°4 : 59-62 L interrompue nette	7,5YR4/4	Frais	5	A		
62	N°5 : 62-85 L ondulée nette	7,5YR5/6	Frais	5	AS	Massive Compact	Très peu poreux R: nulles
85	N°6 : 85-104 L régulière distincte	7,5YR4/4	Frais	5,5	A		
104	N°7 : 104-112 L régulière graduelle	7,5YR4/4	Frais	5	A	20-50 % tâches noires Fe-Mn (Hydromorphie)	Très peu poreux R: nulles
112	N°8 : 112-130 L régulière distincte	7,5YR4/3	Frais	6,5	A		
130	N°9 : 130-143 L ondulée distincte	10YR4/6	Frais	5	A	Massive Très compact	Très peu poreux R: nulles
143	N°10 : -160	7,5YR4/6	Frais	5	AS		
160						20-50 % tâches rougeâtres 10YR5/8 et 10YR5/6	Très peu poreux R: nulles

*Humidité de terrain
**Texture : A=argileuse; L=limoneuse; S=sableuse; AL=argilo-limoneuse; AS=argilo-sableuse; etc.

Les propriétés physico-chimiques du sol brun rouille à halloysite utilisé dans ces travaux sont récapitulées dans le tableau 3. Il s'agit d'un sol avec un faible niveau de saturation, une très forte capacité d'échange pour le potassium et un contenu équilibré en matière organique (C/N de 10). La mesure de la densité apparente a été réalisée directement en utilisant des 10 échantillons non perturbés prélevés à partir de 3 fosses creusées perpendiculairement aux lignes de plantation pour chaque traitement (Ban1 et Ban4). Les échantillons sont prélevés à l'aide de cylindres de 100 cm³ (le diamètre et la hauteur des anneaux atteignent approximativement 51 mm) Le poids d'un échantillon de 100 cm³ de sol (séché dans une étuve à 105°C) donne la "densité apparente sèche", généralement exprimée en g cm³.

**Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques des parcelles étudiées
(CEC : capacité d'échange cationique, nd : non défini)**

Traitement	Ban1			Ban4		
Profondeur (cm)	0-30	30-60	60-120	0-30	30-60	60-120
Distribution des tailles de particules (%)						
Argile < 2 µm	67.1	nd	nd	65.8	nd	nd
Limon 2-50 µm	12.1	nd	nd	13.3	nd	nd
Sable 50-2000 µm	15.1	nd	nd	16.3	nd	nd
Propriétés chimiques						
C organique %	1.22	1.16	0.79	1.24	1.10	0.99
N total %	0.13	0.12	0.08	0.12	0.10	0.10
C/N	9.7	10.1	9.5	10.3	10.6	10.0
pH H ₂ O	5.0	5.0	5.3	5.1	5.1	5.3
CEC (cmolckg ⁻¹)	15.9	20.0	26.8	13.5	17.4	21.8
Bases échangeables (cmolc.kg ⁻¹)	11.0	9.0	9.7	11.0	9.5	9.8
Potassium (cmol eq kg ⁻¹)	3.4	1.8	1.3	3.3	1.7	1.3
Calcium (cmol eq kg ⁻¹)	4.9	4.9	6.1	4.9	5.3	6.0
Magnésium (cmol eq kg ⁻¹)	2.7	2.3	2.3	2.7	2.6	2.5
Densité des horizons (g.cm⁻³)	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0

Les sous chapitres suivants sont organisés par thématique, un thème étant un terme du bilan de l'azote quantifié au cours de ces travaux. Pour chaque thème sont présentés un résumé en français et en anglais, la démarche expérimentale, les résultats obtenus et leur discussion et une conclusion résumant les points essentiels mis en évidence.

II.2 DYNAMIQUE D'ABSORPTION DE L'AZOTE PAR LA CULTURE²

II.2.1 Résumé

Aux Antilles françaises, l'optimisation de la fertilisation en bananeraie est une nécessité pour la mise en place d'une agriculture durable. La méthode actuelle de gestion de l'engrais azoté basée sur le seuil critique de pluviométrie ne permet pas, malgré le fractionnement des apports, un ajustement dynamique avec les besoins de la culture, générant ainsi des risques de pollution nutritive des eaux.

L'objet de cet article est d'évaluer la dynamique des besoins de la culture pour une bananeraie à l'établissement (cycle 1 à partir de vitroplant) et pour une bananeraie établie (cycle 4). Des essais sur le terrain ont été réalisés en condition de fourniture d'azote non limitante pour les cycles 1 et 4. Les teneurs en matière sèche et en azote ont été mesurées sur 4 plantes par parcelle à 5 dates pendant le cycle de croissance : plantation, stade de 6 feuilles, différenciation florale, floraison et récolte. A partir de ces données, on définit les courbes maximales de dilution de l'azote.

On observe des différences significatives entre les courbes de premier et de quatrième cycles. La courbe maximum de Ban4 est proche de la courbe critique des plantes en C3. Cela confirme l'absence de la consommation de luxe de l'azote pour une bananeraie et nous permet d'assimiler la courbe maximale à la courbe critique (minimum d'azote requis pour une production maximale de matière sèche). Pour les bananiers de premier cycle, la courbe maximale de dilution obtenue est bien au-dessous de la courbe critique générale des C3 en raison des faibles teneurs en azote des plantes issues de cultures cellulaires.

Les quantités totales d'engrais azotés généralement appliquées dans ces zones de culture ($400 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) représentent plus du double des besoins en azote du premier cycle ($150 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) et plus de 8 fois ceux des cycles suivants ($50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Cette approche démontre donc qu'il est nécessaire d'ajuster de façon plus précise les apports d'engrais aux besoins de la culture tout au long des cycles culturels afin de limiter les risques de dégradation de l'environnement.

Les courbes obtenues permettraient à terme, couplées avec des indicateurs plante, d'élaborer une méthode dynamique permettant l'ajustement des apports d'engrais aux besoins de la culture tout en tenant compte des autres sources d'azote du système sol-plante.

II.2.2 Material and Methods

Materials and Methods

² L'article découlant de ce chapitre est intitulé « Determination of critical nitrogen dilution curves for two contrasting stages of banana crops » et a été soumis en octobre 2006. Les auteurs sont L. Thieuleux, H. Ozier-Lafontaine, J. Sierra, A. Lassoudière.

Experimental site

The study was carried out on experimental plots of CIRAD (International Centre for Agronomic Research and Development) in Martinique (Altitude : 200m, Latitude: 14.4 N, Longitude: 61.5 W), at the Domaine de Rivière Lézarde (Geographical coordinates X=715, Y=1621, IGN map "Trinité"). Mean annual rainfall lies between 2000 and 2500 mm and the mean annual temperature is 26°C. The dry season lasts from January to June with a monthly rainfall of 96 to 198 mm and mean monthly temperatures from 24 to 26°. The rainy season is from July to December with rainfall of 232 to 328 mm and mean monthly temperatures of 26°C.

The plots were situated on a nitisol belonging to the fersialitic group on which numerous banana plantations are located. The rust-brown halloysitic soil (Colmet-Daage, 1965) is a clayey soil with 65% clay, 13% silt and 17% sand. It is acid, with a pH(water) of 5.57 and a pH(KCl) of 4.89. The CEC is 15.59 meq/100g. The exchangeable base contents are : K ; 2.73 mmol_c/100g , Ca ; 4.63 mmol_c/100g, Mg : 3.53 mmol_c/100g. The organic matter content is 2.44 %, with 1.42 % carbon and 0.12 % nitrogen. The C/N ratio is 10.5.

Experimental design

Two experimental plots of 200 m² intended to compare two key stages in the life of banana plantations were instrumented so as to be able to characterise (i) the growth and development of the two treatments compared (newly planted plantation vs established plantation) and (ii) nitrogen absorption by the plantation. These two treatments were (i) treatment Ban1 in which the banana trees of the preceding cycle were grubbed out without returning the residues, followed by a 2-3 month fallow and then planting of tissue cultured plants without soil tillage, and (ii) treatment Ban4, which represented an established plantation (4th cycle), with crop residues returned, and in which the plants were cut back close to the ground at the start of the experiment. In treatment Ban1, planting was done with tissue culture plants. The crop therefore began from plants with an already-developed and functional leaf surface and root system. This planting was done in double rows, with 3.1 m between the paired rows and 1.8 m separating the two rows of each pair. (0.18 banana trees m⁻²). In treatment Ban4, the banana trees were already planted in double rows and were cut down, i.e. the mother plant was cut back at a time other than harvest so as to allow uniform removal of dominance by the mother plant on the selected shoots, which then returned to a phase of rapid growth in leaf area. This procedure enabled us to start a new growth cycle at the same time as the development of the tissue culture plants in Ban1.

Average nitrogen applications were 370 kg ha^{-1} in order to ensure non-limiting nitrogen for both treatments. The higher applications of diammonium phosphate in the first cycle (49 kg N ha^{-1} , 135 kg P ha^{-1} as against 16 kg N ha^{-1} , 16 kg P ha^{-1}) compensated for the losses of nitrogen by leaching which could occur when the soil was bare before planting. These applications meant that the growth cycles began with comparable soil mineral N contents for the two treatments (fig. 11). The applications of other fertilisers were similar for the two treatments : 350 kg N ha^{-1} as urea, $120 \text{ kg Ca ha}^{-1}$, 80 kg Mg ha^{-1} , 120 kg K ha^{-1} .

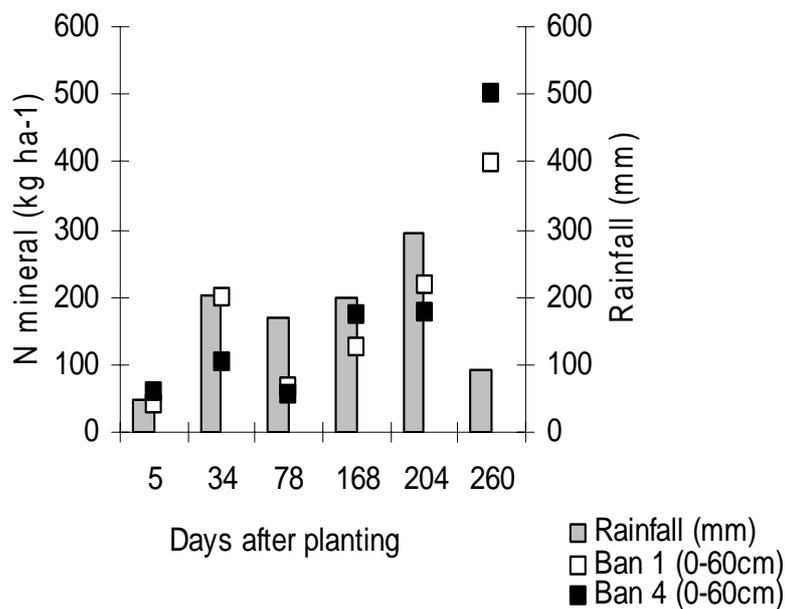


Figure 11. Mineral N in soil (0-60cm) under Ban1 and Ban4 during the crop cycles. Days after planting for Ban4 means days after cutting the mother plant. Rainfall figures are monthly averages.

Monitoring the moisture status of the crop

The rainfall data during the measurement period came from the weather station on the

experimental farm at Rivière Lézarde. On each plot, soil moisture content was measured using 27 tensiometers placed at 3 positions in the banana plantation planted in double rows (under the trees, in the wide inter-row space and in the narrow inter-row space), at 3 depths (30, 60 and 120 cm) with 3 replicates. The moisture monitoring of the plots made it possible to make good the measured rainfall deficits (rainfall below 120 mm) by means of sprinkler irrigation at the start of growth (fig. 12).

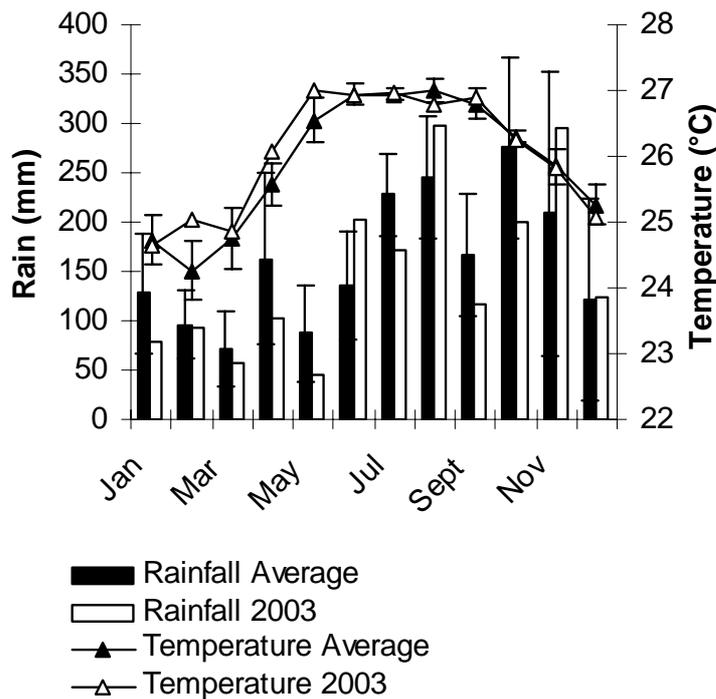


Figure 12. Climatic characteristics of the site: comparison of monthly average (1999-2004) rainfall and temperature and the monthly rainfall and temperature in 2003.

Sampling and analysis

Sampling was done on banana trees on the edges of the plots whose circumference was similar to that of the trees inside the plots ($p < 0.05$). Sampling from the edge avoided perturbing the microclimatic conditions of growth of the adjacent banana trees, with a high LAI. Samplings of 4 plants per plot were made at

5 dates during the growth cycle : planting the tissue culture plants, 6-leaf stage, 12-14-leaf stage or pre-floral differentiation, flowering stage (inflorescence emergence) and harvest stage (cutting the bunch with a grade of 32 mm of the median fruit of the last hand). The plants were separated into different organs – leaf laminae, petioles and veins, pseudostems, inflorescences and roots. The total fresh weight of each organ was measured. An aliquot of each type of organ was taken and weighed fresh. The dry weight of the aliquots was measured after oven-drying at 70°C for 72 hours. Measurement of total nitrogen of the ground samples was made using a CHNS-O elemental analyser.

Statistical treatment

Since it was impossible to measure the leaf area of the crops at each sampling stage or for each weight class, the dynamics of leaf area during the course of growth were estimated from the graph established by Jannoyer (1995) during banana experiments in the humid tropics on an andosol. The relationship obtained for the leaf area index (LAI) was as follows :

$$LAI = 0.0204 * e^{-0.0335 DAP}, \tag{1}$$

where DAP represents Days After Planting for Ban1 and days after cutting down for Ban4. The two treatments were compared by Analysis of Variance ($p < 0.05$). The results were analysed using concepts already tested on arable crops, i.e. by fitting the dilution law proposed by Salette et Lemaire (1981) taking account of the growth rate of the plant and its

nitrogen uptake during the growing season and the progressive fall in the ratio of nitrogen taken up to dry biomass produced.

The statistical model describing this function is :

$$\% N = a DM^b \quad (2)$$

where $\%N$ ($g N 100g^{-1} DM$) is the nitrogen concentration in the shoot dry matter, DM ($Mg ha^{-1}$) is the dry matter accumulated during the growth phase, a represents the concentration of nitrogen in the dry matter at the end of the period of exponential growth, b is a statistical parameter governing the slope of the relationship. To test dilution curves, the function described in equation (1) was linearised by logarithmic transformation.

$$\log (N) = \log (a) + b \log (MS) \quad (3)$$

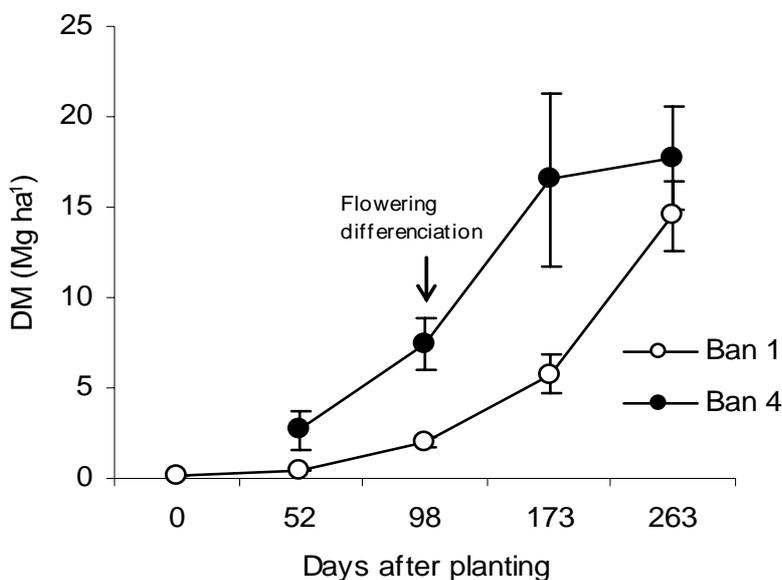
reducing it to the generalised form : $y = \alpha + \beta x + \epsilon$.

II.2.3 Results

Effect of the growth cycle on dry matter production

The production of dry matter (fig. 13) was $18 Mg ha^{-1}$ for Ban4 as against $14.5 Mg ha^{-1}$ for Ban1. The dry matter produced is thus greater for the Ban4 situation (semi-perennial) than for the newly-planted Ban1 ($p < 0.05$).

For Ban4, the evolution of dry biomass of the banana tree between planting and harvest follows a sigmoid curve with a maximum growth rate during the period between 52 days after



planting and one month after

flowering, i.e. about 135 days. The dry matter produced no longer increases after flowering ($p < 0.05$).

For Ban1, the increase in dry matter is more exponential, with a maximum increase between flowering and mid-harvest.

Figure 13. Dry matter accumulation in Ban1 and Ban4 treatments during crop cycles. Days after planting for Ban4 means days after cutting the mother plant.

The components of yield for the two treatments are shown in table 2.

Production is 1.5 times higher for the plot in the 4th cycle, Ban4 (70 Mg ha⁻¹) than for Ban1 (40 Mg ha⁻¹). The yields are significantly different (p<0.05). The banana trees also had a greater circumference in the 4th cycle (p<0.05), indicating greater vegetative development than in the first cycle.

Table.2 Yield components of banana at harvest.

Each value represents the average of eight (Ban1) or four (Ban4) plants randomly selected.

* Identical letters mean that the differences are not significant ($P \leq 0.05$).

CV is the coefficient of variation.

		Ban 1	CV (%)	Ban 4	CV (%)
Plant	Circumference (cm)	50.22a	6	69.83b	6
Bunch	Yield (Mg ha ⁻¹)	41.19a	18	68.25b	24
	Weight of banana bunches (kg)	23.01a	18	37.91b	22
	Number of hands	6.85a	10	8.50b	6
	Rank of fingers	31.03c	8	31.10c	8

Nitrogen uptake by the crop in the different growth cycles

Figure 14 illustrates absorption of nitrogen for the two treatments in the course of the growing period.

The demand for nitrogen by each harvest is the product of the dry weight and the fraction of nitrogen which it contains. At harvest, the nitrogen contents of the banana trees in the 4th cycle are similar to those in the newly planted plot. The Ban4 crop contained 185 kg ha⁻¹ as against 170 kg ha⁻¹ for the Ban1 crop.

The Ban1 crop showed a low nitrogen consumption in the first two months after planting, after which its requirements increased rapidly until flowering. At this moment the rate of absorption of nitrogen slowed down but continued until harvest. The Ban4 crop on the other hand had a high content (100 kg.ha⁻¹) of nitrogen from the start of growth ; this then increased until floral differentiation and remained at that level until harvest.

The absorption of Ban4 during growth was 53 kg ha⁻¹ of nitrogen, as against 138 kg ha⁻¹ of nitrogen for Ban1. The absorption of nitrogen of Ban4 was 3 times greater than that of Ban1 at the moment of floral differentiation, after which the difference between treatments diminished until harvest, when the quantities of nitrogen were similar for the two cycles.

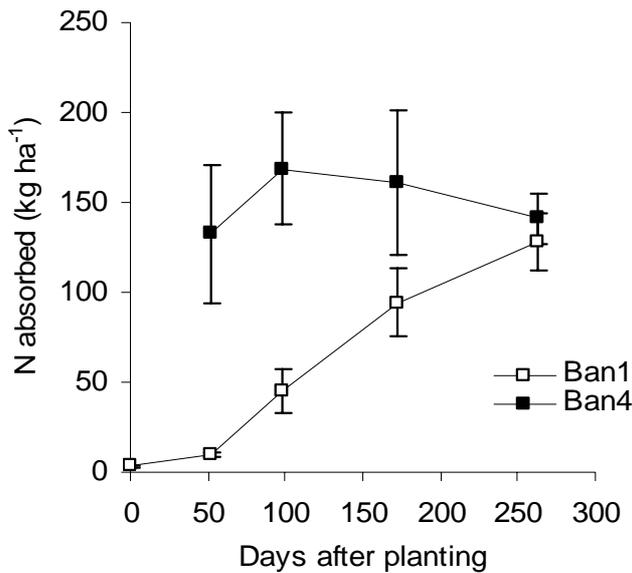


Figure 14 Nitrogen uptake in Ban1 and Ban4 during the crop cycles. Days after planting for Ban4 means days after cutting the mother plant.

Dilution curve of nitrogen in the banana plantation.

The dilution law proposed by Salette et Lemaire (1981) is observed in the banana tree (fig. 15). The relationship $\%N = 8.86 DM^{0.74}$ ($R^2=0.989$) fits the dilution curve of the banana obtained from

measurements made on Ban4, and the relationship $\%N = 2.83 DM^{-0.32}$ ($R^2=0.876$) fits that obtained for bananas in the first cycle, Ban1. There are differences between the dilution kinetics of nitrogen in Ban1 and Ban4. The statistical tests described earlier show significant differences ($P<0.05$) between the Ban1 and Ban4 curves. For the same dry weight, the diluted $\%N$ is twice as high at the start of the cycle for Ban4. Dilution is then exponential for Ban4 in agreement with what is usually observed for C3 plants forming a closed canopy (Greenwood, 1990). The percentage of nitrogen in the plants returns to a similar level for both situations at

harvest.

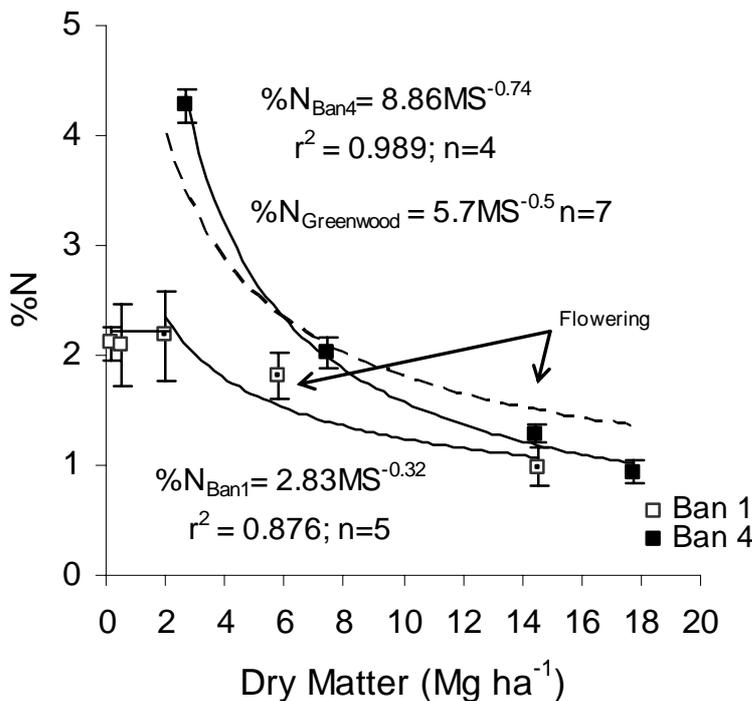


Figure 15. Nitrogen dilution curve of banana in treatments Ban1 and Ban4 compared to the reference curve of Greenwood et al. (1990) (dashed line).

Evolution of LAI during growth

In figure 16, very different trends in LAI may be seen for Ban1 and Ban4. In Ban1, there are two development phases of LAI with a very slow start, from planting to floral differentiation and then an acceleration in growth rate.

From floral differentiation, the Ban1 crop grew at a similar rate to that of Ban4 with very similar slopes for the linear relations but different y-coordinates at the origin.

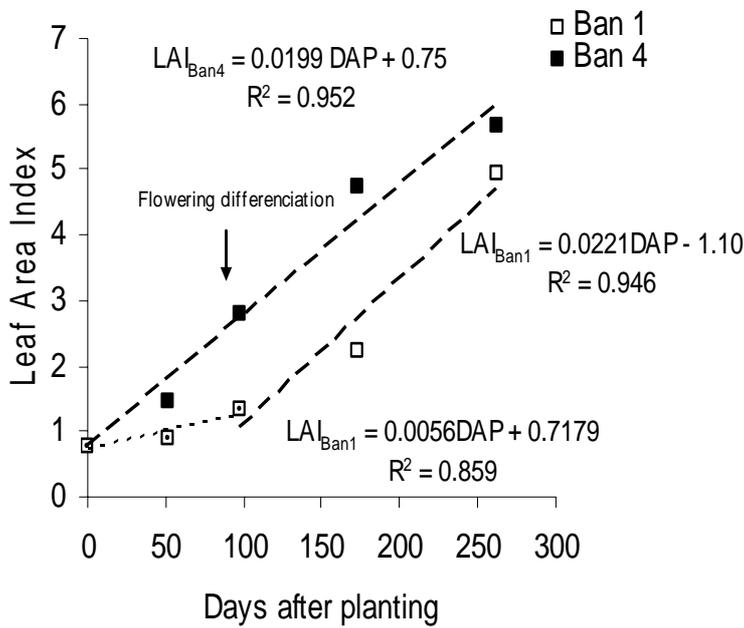


Figure 16. Development of LAI in Ban1 and Ban4 during their cycles. Days after planting for Ban4 means days after cutting the mother plant.

Relationship between nitrogen content and LAI during growth

Figure 17 shows a good correlation between total plant N and LAI during the growth cycle for both types of banana

plantation. The coefficients of the relationships are however very different ($p < 0.05$), the relative nitrogen contents being higher in a banana plantation in its 4th cycle than for one in its 1st cycle, for the same LAI.

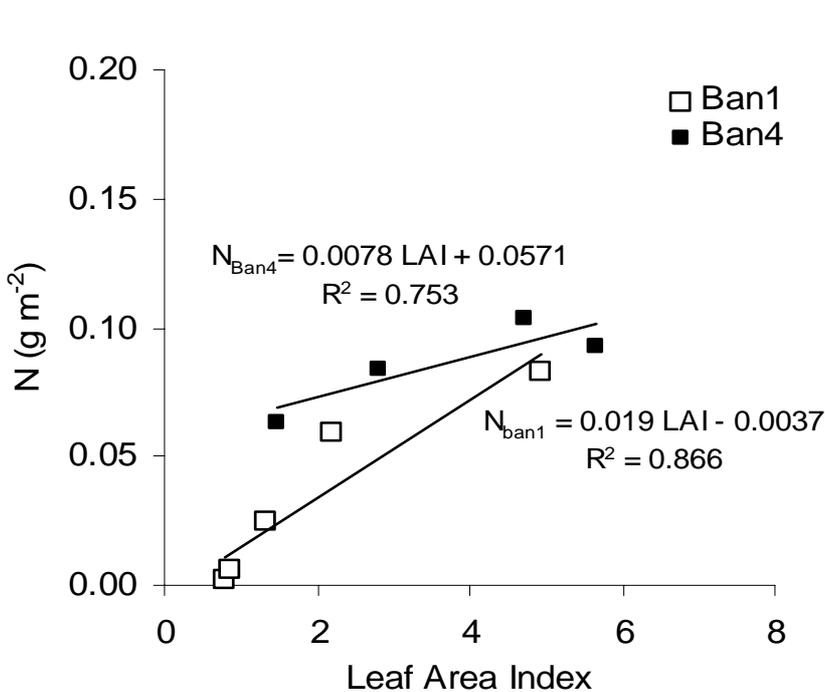


Figure 17. Relationship between N and LAI in Ban1 and Ban4 treatments.

Relationship between total nitrogen in the different organs during the growth cycles

Table 3 shows the coefficients of the linear correlations between nitrogen in the leaf laminae, the pseudostems and the petioles with the total nitrogen in the plant throughout the growth cycle. The best

correlation coefficients were observed for the leaf laminae and pseudostems for Ban1 and

Ban4. One should note that the relationships obtained in the 1st cycle (Ban1) are better (correlation coefficient higher) than those obtained in the 4th cycle (Ban4) where there was a desynchronisation of the population growth and thus more variability in the plant measurements.

Table 3. Significance of the correlations (r^2) between the nitrogen content of various organs and the total nitrogen content of the banana tree during cycles 1 and 4.

Linear relation: $Y = a X + b$

X = N total plant content (g)

Y = N organ content (g)

Organs	a	b	r^2
Lamina Ban1	0.517	0.000	0.978
Lamina Ban4	0.653	-17.726	0.779
Pseudostem Ban1	0.517	0.000	0.972
Pseudostem Ban4	0.426	0.000	0.681
Petioles-veins Ban1	0.051	0.339	0.921
Petioles-veins Ban4	0.178	-2.589	0.301

II.2.4 Conclusion

The results of this study confirm that the banana tree follows the general nitrogen dilution law with however a clear difference in the dilution kinetics between the two situations, i.e. newly-planted bananas (Ban1) and established bananas (Ban4).

For the newly-planted banana plantation, in spite of a non-limiting nitrogen supply, the dilution curve obtained is well below the generic critical curve for C3 plants proposed by Greenwood (1990). This is because of the low nitrogen contents of tissue culture plants at planting time. For the same dry biomass the shoot attached to the mother plant is better nourished than the tissue culture plant. Recent studies (Declerck et al., 1995, Fogain et al., 2001) show that root colonisation of tissue culture plants of bananas by natural symbionts, i.e. arbuscular mycorrhizal fungi, significantly increase the growth of the tissue culture plants.

Hence the tissue culture plants would experience a “stress” when put out into the field, which is manifested in particular by a reduced leaf area in the plantation at floral differentiation. At the stage of floral differentiation, the growth of the banana trees becomes similar to that of the

following cycles, with nitrogen uptake in relation with this growth. At harvest, the concentration of nitrogen in the plant is the same as that of the following cycles.

The present approach, which consists of applying large quantities of nitrogen fertiliser at planting and during the first months of the crop, does not seem to be appropriate and is revealed to be the more dangerous for the environment as the tissue culture plants have very limited growth and development, and hence nutrient absorption, during this period. The maximum dilution curve for the fourth cycle, representative of the following cycles, is close to the critical curve for C3 plants. This confirms that the banana is incapable of accumulating nitrogen to cope with periods of nitrogen unavailability in the environment (Martin Prével et Montagut, 1966), the accumulation of nitrates in the translocation organs causing a rapid inhibition of nitrogen absorption. It is therefore possible to equate the maximum nitrogen dilution curve for an established banana plantation (2nd and later cycles) to the critical nitrogen dilution curve (minimum nitrogen required for maximum dry matter production).

It should be noted that for the Ban4 relationship, the high value of the coefficient “a” corresponds to the nitrogen content of the plant before the accumulation of 3 tonnes of dry matter, i.e. in a period when the banana tree is in physiological relationship with the mother plant. The dilution curve for Ban4 is therefore only valid from the moment when the shoot is separated from the mother plant. The ordinate at the origin of the Ban4 dilution curve has no biophysical significance. The constant value of %N before 1 tonne of dry matter per hectare have to be defined by additional studies to estimate the plant’s requirements in the period when the mother plant inhibits the development of the shoot whilst providing it with assimilates to allow it to accumulate reserves, notably of nitrogen, before the adult vegetative phase (Lassoudière, 1978, 1980).

The analysis of vegetative organs (leaf III in the banana tree) is usually done at the time of harvest so as to adjust the total nitrogen fertilisation for the following year. This approach does not allow the farmer to monitor regularly the nutritional status of the crop or to best adjust applications to the nutritional needs of the crop. Since measurements on whole plants are difficult to carry out in real time, technical institutes and the fertiliser industry have developed analytical tools to indicate the nitrogen status of the plant. Among others one can find tools to measure the nitrate content of a part of the plant during growth (stem base for wheat, petiole for potato). One can then define an Index of Nitrogen Nutrition (INN) calculated at each instant (i.e. for each level of biomass of the crop) by the ratio of the nitrogen content measured in an indicator plant and the critical content :

$$INN = \% N \text{ measured} / \% N \text{ critical} \quad (4)$$

In relation to the critical curve, the INN differentiates two zones :

Populations situated on the curve or its immediate neighbourhood are optimal for nitrogen nutrition as regards biomass production, i.e. their nitrogen content assures the maximum growth possible, given the soil and weather conditions (INN=1).

Crops situated below the curve are experiencing nitrogen deficiency : nitrogen is a limiting factor for growth (INN<1).

From the information thus gathered, one can then decide as to the value or otherwise of applying additional nitrogen.

The analyses of different organs of the banana tree throughout the growing period show good correlations between the N contents of the leaf laminae and the total nitrogen contents of the plant for both growth cycles. The leaf laminae, which are easy to sample, are thus a good candidate for defining a reliable indicator of the nitrogen status of the crop.

II.3 EFFICACITE DE L'ENGRAIS³

II.3.1 Résumé en français

Pour préserver la qualité de l'environnement, il est nécessaire de fournir des directives et des outils de gestion des engrais de plus en plus précis. En cultures bananières, un préalable indispensable à l'optimisation de la fertilisation est de connaître le devenir de l'engrais dans le cadre de la gestion actuelle selon la méthode du Seuil Critique de Pluviométrie.

Pour caractériser les processus de métabolisation de l'azote de l'engrais, la méthode du traçage isotopique à l'azote 15 a été utilisée. Deux essais ont été réalisés. Dans le premier essai, l'urée marquée a été appliquée à la différenciation florale (¹⁵N : 0.93 %) et à la floraison (¹⁵N : 5.03 %) pour comparer l'efficacité de l'engrais en fonction de la date d'apport et évaluer la distribution de l'engrais dans les différentes parties de la plante. Deux répétitions agronomiques par traitement sont considérées. A la floraison et à la récolte, quatre plantes sont prélevées sur chacune des deux parcelles. Leurs poids frais et sec sont déterminés, ainsi que leur teneur en azote et en azote 15.

Dans le second essai, il s'agissait de comparer l'efficacité de l'engrais selon le stade de la plantation en effectuant un apport à la floraison pour un cycle 1 (¹⁵N : 5.03 % et un cycle 4 (¹⁵N : 5.01%). Dans les compartiments plantes (à la récolte) et sol (6, 15, 30 et 45 jours après apport et à la récolte), des mesures de l'azote et le l'azote 15 ont été réalisées. L'azote non retrouvé est considéré comme perdu par lixiviation.

Les résultats majeurs de ces travaux soulignent la faible efficacité de l'engrais, de l'ordre de 20 à 35 %, pour des apports à la différenciation florale et à la floraison. L'efficacité étant la plus élevée pour l'apport le plus précoce. Des contrastes du devenir de l'engrais sont mis en évidence entre un premier cycle et un quatrième cycle, du fait essentiellement de l'organisation de l'azote de l'engrais dans le sol, plus élevée en cycle 4, où des résidus de récolte et des souches plus nombreuses sont en décomposition.

La faible efficacité de l'engrais est expliquée par le décalage entre l'importance des apports et les besoins plus faibles du fait notamment de la présence d'autres sources d'azote provenant de la minéralisation de la matière organique du sol, et des résidus de culture.

Proposer des méthodes d'amélioration de la gestion de l'azote dans les plantations de bananes implique donc de prévoir d'une part la restitution de l'azote de l'engrais organisé et d'autre part la dynamique de libération de l'azote provenant des autres sources.

II.3.2 Material and methods

Experimental site

The field experiments were set in Northern Martinique (French Antilles, 14.4 N, 61.5 W, elevation : 200m) during the rain season between September 2003 and January 2004 at "Rivière Lézarde", an experimental station of CIRAD (Center of International cooperation in Agronomic Researches for the Development) situated at Lamentin. This plantation is on a clayey Nitisol (FAO, 1992) which is acid with a low saturation level, a very high exchangeable potassium and equilibrated content of organic matter i.e C: N ratio near 10.

³ L'article découlant de ce chapitre est intitulé « Crop banana stages determine the fate of nitrogen fertilizer » et a été soumis en septembre 2006. Les auteurs sont L. Thieuleux, S.Recoux, J.Sierra, R.Oliver, A. Lassoudière, H. Ozier-Lafontaine.

Further information is given in Table 4. The average annual rainfall ranges from 2000 to 2500 mm and the mean annual temperature is 26°C. The dry season lasts from January to June with a monthly rainfall of 96 to 198 mm and monthly mean temperatures from 24 to 26°. The rainy season is from July to December with rainfall between 232 to 328 mm and monthly mean temperatures of 26°C.

**Table 4. Physical and chemical properties of clayey nitisol of Martinique
Extraction of exchangeable bases (EB) with ammonium acetate nat pH 7.0
Ban1: cycle 1; Ban4: illustrating 2nd cycle and following; Nd : no determined**

Treatment	Ban1			Ban4		
Depth (cm)	0-30	30-60	60-120	0-30	30-60	60-120
Particle size distribution (%)						
Clay < 2 µm	67.1	Nd	nd	65.8	nd	nd
Silt 2-50 µm	12.1	Nd	nd	13.3	nd	nd
Sand 50-2000 µm	15.1	Nd	nd	16.3	nd	nd
Chemical properties						
Organic C %	1.22	1.16	0.79	1.24	1.10	0.99
Total N%	0.13	0.12	0.08	0.12	0.10	0.10
C/N	9.7	10.1	9.5	10.3	10.6	10.0
pH H ₂ O	5.0	5.0	5.3	5.1	5.1	5.3
CEC (cmol eq kg ⁻¹)	15.9	20.0	26.8	13.5	17.4	21.8
Exchangeable Bases (cmol eq kg ⁻¹)	11.0	9.0	9.7	11.0	9.5	9.8
Potassium (cmol eq kg ⁻¹)	3.4	1.8	1.3	3.3	1.7	1.3
Calcium (cmol eq kg ⁻¹)	4.9	4.9	6.1	4.9	5.3	6.0
Magnesium (cmol eq kg ⁻¹)	2.7	2.3	2.3	2.7	2.6	2.5
Bulk density of soil layers	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0

Experimental design

Two experiments were conducted. In a first experiment, we measured the use of fertiliser N applied at floral differentiation by the banana plant and its distribution in the various plant parts.

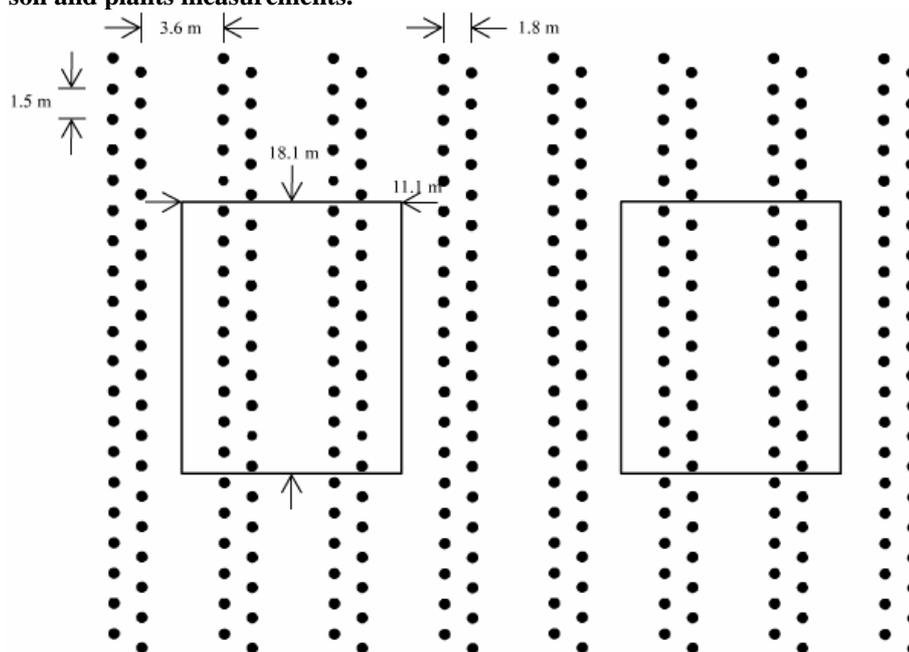
This was done at flowering time (37 days after 15N application, DAA) and harvest time (127 DAA), then at the harvest of the second cycle to determine the subsequent use of the residual fertiliser N. the second experiment consisted in comparing the fate of fertiliser N application in soil and its use by a banana crop, as a function of growth cycle (1st vs. 4th cycle).

To do so, two plants treatments were carried out: (i) treatment Ban1 (first cycle of banana crop), starting with the planting of vitro plants (*Musa Acuminata*) without soil tillage, after a previous banana plantation that was grubbed out without returning the residues; (ii) treatment Ban4, which represented the 4th cycle of an establish banana plantation, with crop

residues returned on soil each year since 3 years. In the case the mother plants were cut back at the start of the experiment, so as to suppress the dominance exerted by the mother plant on the selected shoots, which then returned to a phase of rapid growth in leaf areas. The crop characteristics are described in Table 2. This procedure enabled us to synchronise the start of a new (4th) growth cycle with the development of the vitro plants in Ban1.

The area plots of 200 m² (Roose, 1977; Perrier, 1986) were designed as a double-row pattern (fig.1), with 3.1m distance between the paired brows and 1.8m distance separating the two rows of each pair, at a density of 1800 plants per hectare (Fig.18). Therefore, two experimental area of 200 m² for each banana treatment (Ban1 and Ban4) were delimited by 60 cm wide galvanised iron sheets inserted 50 cm into the soil around these plots. Within these areas, micro-plots of 1 m² area were designed around the bottom of individual banana trees.

Figure 18. Experimental design of banana crops in a double row pattern. Location of 200 m rectangular area for soil and plants measurements.



N treatments : For Ban1, 18 micro-plots, were given 45 kg N. ha⁻¹ as ¹⁵N labelled urea with 0.93 % atom excess on 09 September 2003 (floral differentiation urea application) , and 18 other micro-plots were given 45 kg N. ha⁻¹ as ¹⁵N labelled urea with 5.01 % atom excess on 10 October 2003 (flowering urea application). For each date as unlabelled urea, the other banana trees of the plot were given the same amount of fertiliser-N at each date as unlabelled urea. An additional 45 kg N. ha⁻¹ was given on 03 November 2003 to cover total crop demand until harvest time according to farmers' practices.

The ¹⁵N labelled urea was added in water solution (50 mL.m⁻²) directly to the soil in a circular band around the banana mat at a distance of 0.5m from the mat to enhance the

diffusion of labelled-N into the top few centimetres of soil and to avoid contamination of the banana canopy with labelled-N (fig.19). The method placement of urea solution is in accordance with grower practices. The N application was made during the rainy season and irrigation was not necessary. The schedule for ^{15}N applications and sampling is summarises in Table 5. Air and soil temperature were automatically monitored each hour.



Figure 19. Fertilizer supply

Table 5. Crop characteristics according to crop cycles.

Ban1: cycle 1; Ban4: illustrating 2nd cycle and following; DAP: days after planting; DAC: Days after cutting back.

Treatment	1st crop cycle (Ban1)	4th crop cycle (Ban4)
Crop characteristics		
Cultivar	Grande naine	Grande naine
Start of growth cycle		
Origin	Vitroplants	Shoots after cutting back the mother plants
Date	28/05/2003	12/06/2003
Preceding crop	Banana (2000-2002) – Pineapple (1998-2000)	Banana (2000-2002) – Banana (1998-2000)
Preceding fate of crop residues	3 years crop returned last crop residues removed	4 years crop returned
Key- stages		
Planting	26/05/2003 (0 DAP)	18/06/2003 (0 DAC)
6 leaves	17/07/2003 (52 DAP)	17/07/2003 (29 DAC)
12-14 leaves or floral differenciation	01/08/2003 (101 DAP)	01/08/2003 (78 DAC)
Flowering	15/10/2003 (142 DAP)	15/10/2003 (119 DAC)
Harvest	16/01/2004 (245 DAP)	16/01/2004 (212 DAC)
^{15}N Fertiliser applications		
1st dressing (kg.ha ⁻¹)	45, 9 September 2003	45, 9 September 2003
^{15}N Atom-Excess	0,93%	Unlabelled N
2nd dressing (kg.ha ⁻¹)	45, 10 October 2003	45, 10 October 2003
^{15}N Atom-Excess	5,03%	5,01%
Unlabelled N Fertiliser application	45, 03 November 2003	45, 03 November 2003

Plant sampling

In the first experiment, measurements of dry matter, N content (%) and isotopic enrichment in

^{15}N in the plants were carried out in 8 plants out of the 18 plants labelled (the 10 others were preserved for a residue decomposition study), at flowering (inflorescence emergence) and harvest, by cutting the bunch with the grade of 32 mm of the median fruit of the last hand. In the second experiment, these measurements are realised only at harvest from 4 plants out of the 18 plants labelled. The banana plants were not cut but tear up helped with a hollow chisel and were separated into 5 different plant parts – leaf laminae, petioles and veins, corm-pseudostems, inflorescences of bunch and roots. The suckers selected at floral differentiation (one per plant, in according to farmers' practices, all the others shoots before and after this selection, have been teared up) were left in place, and sampled at the harvest 2, one year later. For this second harvest, all the shoots were teared up; i.e the selection of a sucker was not done to continue the crop cycle. The total fresh weight of the plant was measured. An aliquot of each type of plant parts was taken and weighed fresh. The dry weight of the aliquots was measured after oven-drying at 70°C for 72 hours.

Yield, dry matter and N content of the plants were determined on these plots at harvest time. Measurement of total nitrogen of the plant samples was made using a CHNS-O elemental analyser.

Soil sampling

Soil samples for each layer and each replicate were composed by mixing 18 cores (8cm diameter) taken at 0-10 10-30 30-60 cm depth of each micro-plot at 6, 15, 30 and 45 days after liquid urea application and at harvest time. For this last sampling time, the 60-120 cm soil layer was also sampled. Soil inorganic N was determined in KCl soil extracts (200 ml 1M KCl per 50g fresh soil, shaken for 30 min) with autoanalyser (Bran and Luebbe).

The isotope ratio of mineral N in soil extracts was determined using the microdiffusion technique described by Fillery and Recous (2001). Briefly, 10 ml of KCl soil extract was added to a glass jar containing a mixture of KCl, MgO, Devarda's alloy and a surfactant (Brij 35) and acidified glass fiber filters (10 μl 1M H_2SO_4) were used to trap the NH_3 . A single filter was hung from a stainless steel wire hook glued to the under side of the glass jar lid. The lids were then fitted and the jars were kept at 20°C for 7d. The acidified filters were taken removed and placed in a tin foil capsule. The isotopic ration (^{15}N) was measured within 24 hours. Standard solutions were used to check that all NH_3 had been recovered.

Concentrations of soil samples in $^{15}\text{N-NH}_4^+$, $^{15}\text{N-NO}_3^-$ were measured by a colorimeter (Bran and Luebbe) and a mass spectrophotometer and inorganic N, and $^{15}\text{N-organic}$ using a CHNS-O elemental analyser and a mass spectrophotometer.

II.3.3 Results

Climatic characteristics

Figure 20 shows the variations in temperature and rainfall during the experimental period. The air temperature decreased gradually from 28°C to 25°C during the experimental period. Starting on 10th October, rain occurred regularly permitting the soil surface water content to remain close to field capacity. Strong rain occurred at 5, 16, 30 and 40 days after the fertiliser supply corresponding to rainfall of 28, 25, 42 and 20 mm, respectively. The observations from this study were made in climatic conditions representative for this region and this season.

Plant N uptake and fertiliser use after application at floral differentiation (experiment 1)

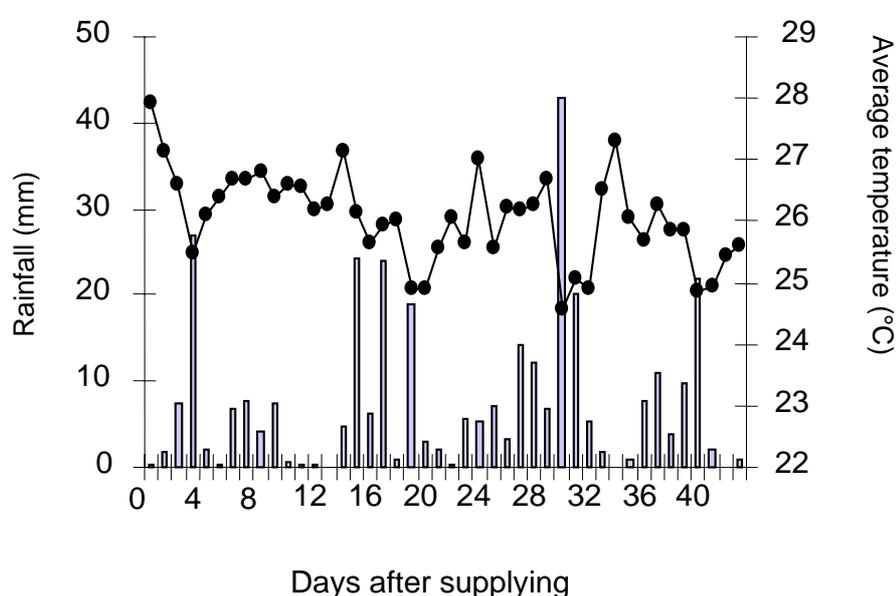


Figure 20. Changing in rainfall (mm) and air temperature (°C) after flowering fertiliser supply (10th October 2003)

Experiment 1 : Plant N and fertiliser N uptake after application at floral differentiation

Table 6 shows the dry matter, total N content and fertiliser N in the various part of banana plant at three sampling times. At flowering, the pseudostems and the laminae represented most of the dry matter accumulated in the plant, in total about 3kg per plant. At harvest, the total DM was 8 kg per plant, and net accumulation (+5kg per plant) since following time resulted from the growth of fruits (representing 62% of total dry matter at harvest), while the dry matter of other plant parts (Laminae, Petiole-veins, pseudostems) remained almost constant. The total dry matter and the distribution in the various parts were rather similar at harvest 2. The concentration of N in the banana plants harvested varied with plant part. Laminae had higher N content than the other parts of the plant and this translated into larger total N accumulation in laminae at flowering. Between flowering and harvest, N concentration did not change significantly in the various plant parts (although a tendency for

decrease was observed in laminae) and as a result of dry matter accumulation, most accumulated was found in bunches (fruits). In total the banana plants (tops plus roots) had taken up, at harvest, about 70-80 g N plant or 130-150 kg N ha⁻¹. The fertiliser N recovery (NUE %) in banana plant amounted to 20.2 ± 6.2 % at flowering and 32.2 ± 7.0 % at harvest 1. Fifty percent of the fertiliser-N taken up by banana plant was accumulated in fruits. At harvest 2, an extra 6.3 % of the initially added fertiliser-N was recovered in the banana plant of the second growth cycle with rather similar relative distribution in the various parts of plants.

Table 6. Dry matter, N and ¹⁵N content, and the fertiliser N use (NUE %) in banana plants sampled at flowering time, harvest 1 and harvest 2 (fertilizer supply at floral differentiation).

Values are means (n=8) ± standard error.

Ban1: cycle 1; Ban4: illustrating 2nd cycle and following; DAP: days after planting.

Ban1flowering1*	Dry matter (kg)	N%	15N %		N total (g.plant-1)	15N total (g.plant-1)		NUE%
Laminae	0.81 ± 0.14	3.4 ± 0.4	0.031 ± 0.0002		27.5 ± 5.7	0.0080 ± 0.0051		7.34 ± 4.6
Petiole-Veins	0.43 ± 0.08	0.8 ± 0.1	0.036 ± 0.0001		3.2 ± 0.4	0.0012 ± 0.0005		1.07 ± 0.5
Pseudostems	1.52 ± 0.47	1.1 ± 0.2	0.048 ± 0.0002		17.1 ± 7.1	0.0079 ± 0.0046		7.31 ± 4.3
Roots	0.14 ± 0.07	3.0 ± 0.3	0.045 ± 0.0001		9.3 ± 5.3	0.0042 ± 0.0025		3.90 ± 2.3
Flower	0.32 ± 0.17	1.0 ± 0.2	0.049 ± 0.0002		1.4 ± 0.5	0.0006 ± 0.0002		0.59 ± 0.2
Total	3.21 ± 0.59	1.8 ± 0.2	0.069 ± 0.0002		58.5 ± 13.6	0.0219 ± 0.0068		20.22 ± 6.2
Ban1Harvest1*	Dry matter (kg)	N%	15N %		N total (g.plant-1)	15N total (g.plant-1)		NUE%
Laminae	0.82 ± 0.15	2.6 ± 0.1	0.034 ± 0.0001		21.6 ± 4.5	0.0070 ± 0.0024		6.49 ± 2.2
Petiole-Veins	0.40 ± 0.07	0.9 ± 0.1	0.038 ± 0.0001		3.8 ± 0.9	0.0014 ± 0.0005		1.30 ± 0.5
Pseudostems	1.73 ± 0.34	1.1 ± 0.1	0.045 ± 0.0002		18.4 ± 4.8	0.0081 ± 0.0038		7.54 ± 3.6
Roots	0.05 ± 0.01	0.9 ± 0.2	0.039 ± 0.0001		0.4 ± 0.2	0.0002 ± 0.0001		0.18 ± 0.1
Fruits	5.07 ± 1.02	0.7 ± 0.0	0.049 ± 0.0002		37.3 ± 7.4	0.0182 ± 0.0073		16.74 ± 6.5
Total	8.07 ± 1.09	1.0 ± 0.1	0.044 ± 0.0001		81.5 ± 12.4	0.0350 ± 0.0081		32.25 ± 7.0
Ban1Harvest2*	Dry matter (kg)	N%	15N %		N total (g.plant-1)	15N total (g.plant-1)		NUE%
Laminae	1.02 ± 0.36	2.3 ± 0.2	0.009 ± 0.0000		23.4 ± 8.9	0.0023 ± 0.0013		2.06 ± 1.2
Petiole-Veins	0.62 ± 0.23	0.5 ± 0.1	0.010 ± 0.0000		3.0 ± 1.1	0.0003 ± 0.0001		0.26 ± 0.1
Pseudostems	2.82 ± 1.71	0.5 ± 0.1	0.014 ± 0.0000		13.7 ± 7.5	0.0018 ± 0.0010		1.61 ± 0.9
Roots	0.09 ± 0.09	0.8 ± 0.1	0.015 ± 0.0001		0.7 ± 0.7	0.0001 ± 0.0001		0.11 ± 0.1
Fruits	3.47 ± 1.87	0.8 ± 0.1	0.009 ± 0.0000		27.6 ± 12.5	0.0022 ± 0.0011		2.03 ± 1.0
Total	8.58 ± 3.11	0.9 ± 0.1	0.008 ± 0.0000		71.4 ± 20.2	0.0065 ± 0.0033		6.36 ± 3.0

Experiment 2: Fate of fertiliser N applied to a 1st and 4th growth cycles of banana plantation.

Soil water content and ¹⁵N dynamics

The soil moisture was high between 40 to 50% gravimetric water content. However a gradient in soil water content was observed under Ban1 (fig.21a) whereas the moisture was more homogeneous under Ban4 (fig.21b).

The dynamics inorganic ¹⁵N were different for Ban1 and Ban4. Under Ban1, mineral ¹⁵N disappeared quickly with only 34.5 % recovered in the 0-60 cm soil layers at day 6 and 7.4 % after 45 days (Fig.21c). Conversely, about 70.0 % of the added ¹⁵N was recovered under Ban4 during 30 days after application, then it decreased rapidly between day 30 and day 45 (Fig.21d). The distribution of mineral ¹⁵N in the soil profile (fig.21c et d) showed a transport of labelled N throughout the soil profile, starting between day 17 and day 30 and continuing between day 30 and day 45. The mineral ¹⁵N was recovered under both N-NH₄⁺ and N-NO₃⁻ forms in Ban1 up to day 45. On contrary, mineral ¹⁵N was mainly under N-NO₃⁻ form day 6 in Ban4 (data not shown).

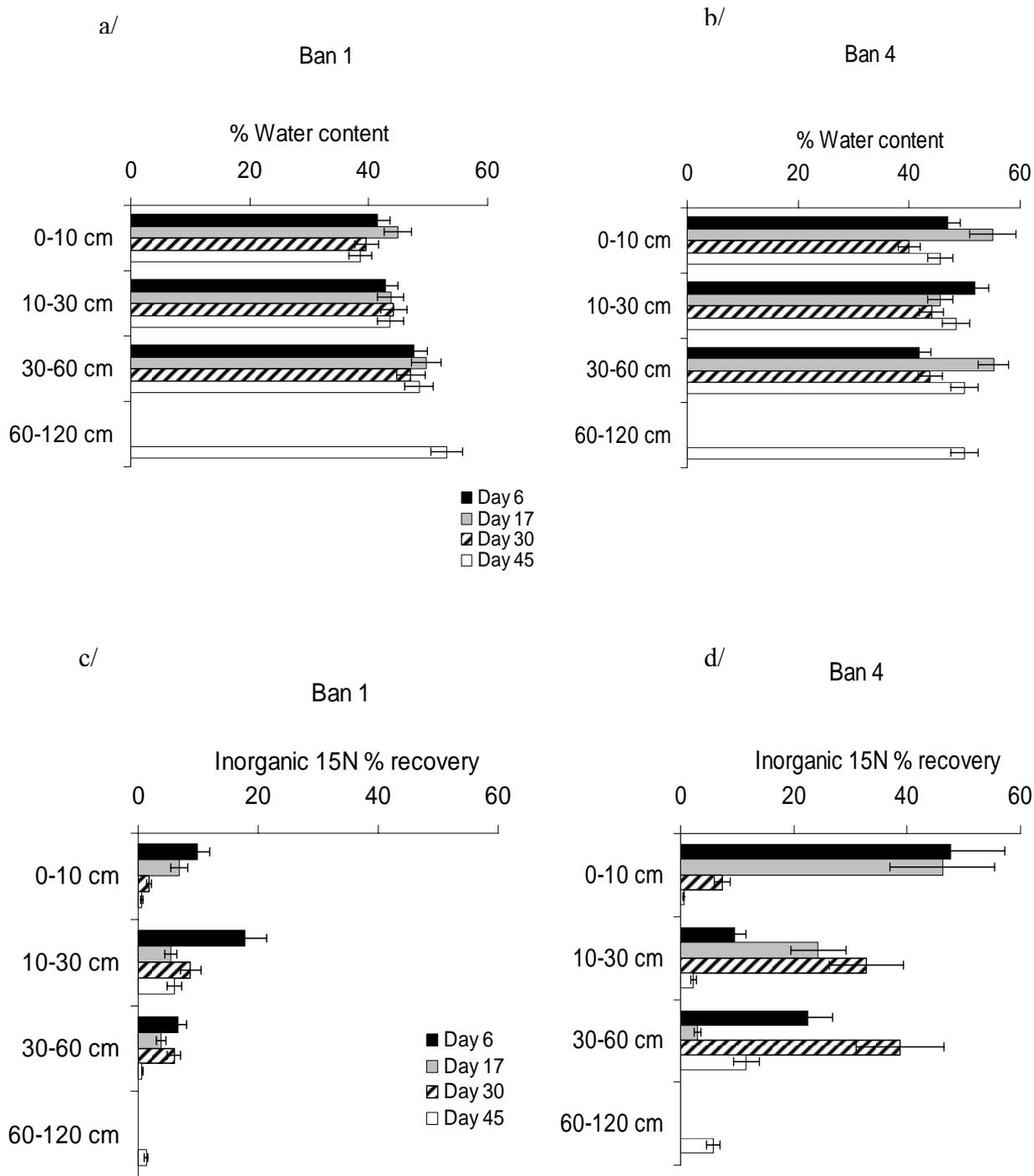


Figure 21. Soil water content in percentage and fate in soil of nitrogen ¹⁵N fertiliser supply (25g per plant). Ban1: cycle 1; Ban4: illustrating 2nd cycle and following. Mineral nitrogen transfers in soil layers expressed in percentage of ¹⁵N applied (1.04 kg ¹⁵N. ha⁻¹).

Part of the labelled N entered quickly the organic N pool as immobilisation occurred (fig.22). it amounted to 18.2 ± 2.7 % of the added N for Ban1 without any significant change over the 6-45 day period. Under Ban4, the immobilisation was twice, at 35.2 ± 6.2 % of the added N, without any significant change over time. As a result, the total recovery of labelled N in soil

was 105.5 ± 7.9 % in Ban4 until day 30 suggesting little uptake by the banana crop and few losses during the first month after application. For Ban1, the recovery was much lower, at most 51.9 ± 7.7 % of the added N. However, despite very different kinetics and total recovery, the portioning of the labelled N between the inorganic and organic pools did not differ much between the two banana treatments at day 45.

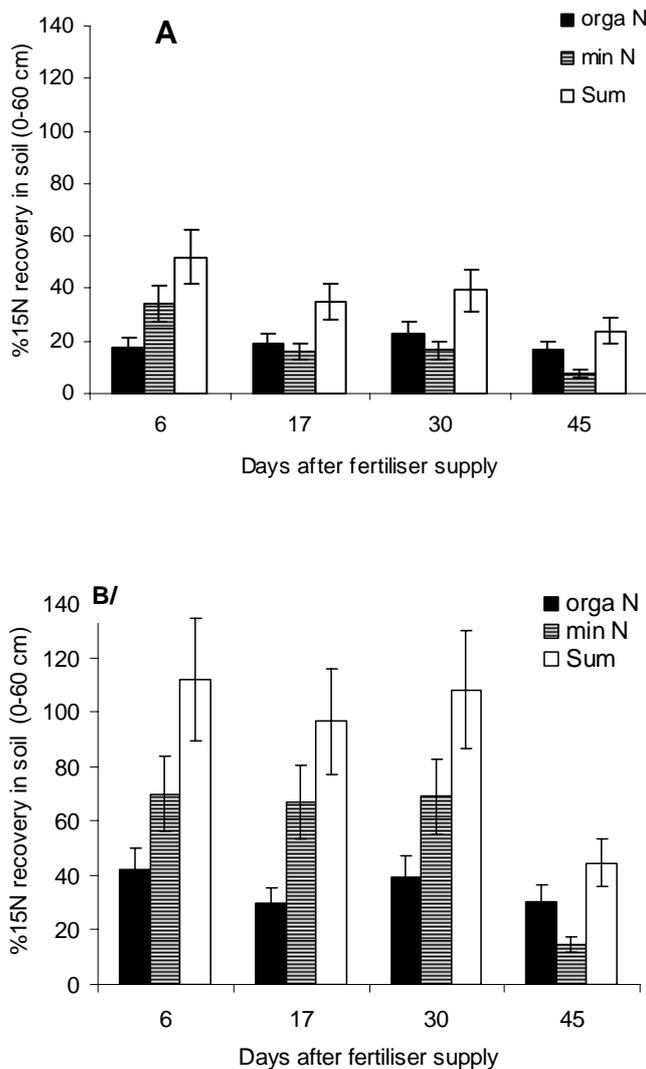


Figure 22. Proportion of mineral N and organic N from fertiliser in the 0-60cm soil layer during 0-45 day period after ^{15}N pulse, expressed par day. Values are means of 18 replicates. Bars are standard deviations of the mean. A=Ban1: cycle 1; B=Ban4: illustrating 2nd cycle and following.

Plant dry matter and N uptake

The dry matter, total N content, and the nitrogen use efficiency NUE at harvest 1 and 2 for Ban1 and Ban4 are given on Table 7. The total dry matter accumulated at harvest 1 was 8.1 ± 1.1 kg for Ban1 and 9.8 ± 1.6 kg for Ban4 without any significant difference. Expressed on an area basis, the total N accumulated in the whole plants was 131.4 ± 9.0 kg N.ha⁻¹ for Ban1 and 92.4 ± 21.1 kg N.ha⁻¹ for Ban4. The mean weighted N concentration

of banana plants deduced from these data therefore significantly higher in Ban1 at 1.63 ± 0.11 % compared to 0.93 ± 0.06 % for Ban4. At the second harvest, the total dry matter was low and similar for both treatments, representing 2.97 ± 0.46 kg DM per plant for Ban1 and 3.45 ± 0.57 kg DM per plant for Ban4. The very low DM (the expected average dry matter at harvest is about 8 kg per plant, as obtained at harvests 1) mainly resulted from the low dry matter of the bunches (data not shown). At harvest 1, the NUE was 22.8 ± 5.0 % for Ban1 and 20.8 ± 1.7 % for Ban4. At harvest 2, the recovery of initially added ^{15}N was similar for

Ban1 and Ban4 at 2.6-2.8 % of the added ^{15}N , representing 15.0 ± 3.0 % (Ban1) and 12.8 ± 2.6 % (Ban4) of the residual ^{15}N measured in soil at harvest 1.

^{15}N balance

^{15}N recovery in plant and soil (mineral plus organic) showed considerable differences between the two treatments at harvest. ^{15}N recovery average was 37.1 ± 5.0 % for Ban1 and 59.0 ± 1.7 % for Ban4 (Tab.8). The difference only resulted from a higher immobilisation with Ban4.

Table 7. Dry matter, N and ^{15}N content, and the fertiliser N use (NUE %) in banana plants of two contrasted treatments (fertilizer supply at flowering).

Values are means (n=4) \pm standard error.

Ban1: cycle 1; Ban4: illustrating 2nd cycle and following.

Harvest1**	Dry matter (kg plant -1)	N%	^{15}N %	N total (g.plant-1)	^{15}N total (g.plant-1)	NUE%
Ban1	8.07 \pm 1.09	1.63 \pm 0.11	0.00100 \pm 0.00022	131.43 \pm 9.01	0.13 \pm 0.03	22.82 \pm 5.00
Ban4	9.84 \pm 1.59	0.93 \pm 0.06	0.00123 \pm 0.00013	92.39 \pm 21.14	0.12 \pm 0.01	20.80 \pm 1.67
Harvest 2**						
Ban 1	2.97 \pm 0.46	0.83 \pm 0.06	0.00054 \pm 0.00020	24.65 \pm 4.40	0.02 \pm 0.00	2.64 \pm 0.73
Ban 4	3.45 \pm 0.57	0.89 \pm 0.17	0.00049 \pm 0.00013	30.45 \pm 7.17	0.02 \pm 0.00	2.83 \pm 0.51

Table 8. ^{15}N balance in the soil plant system for Ban1 and Ban2 at harvests 1 and 2. Recovery of fertiliser nitrogen is expressed in % of applied.

*are the maximum standard error among the different terms of the sum or balance.

	Harvest 1			
	% N fertilizer			
	Ban1		Ban4	
Soil (0-60 cm)	7.4 \pm 1.5		28.9 \pm 5.8	
Soil (60-120 cm)	6.8 \pm 1.4		9.3 \pm 1.9	
Total soil	14.2 \pm 1.5*		38.2 \pm 5.8*	
Total mother plant	22.8 \pm 5.0		20.8 \pm 1.7	
Total plant+soil	37.1 \pm 5.0		59.0 \pm 1.7	
Unrecovered ^{15}N	62.9 \pm 5.0*		41.0 \pm 5.8*	

Discussion

The investigation of fertiliser N dynamics in banana plantations meets several methodological problems inherent to the banana plant, i.e (i) the size of the plant and the little density of plants by surface area, that implies a rather large variability in dry matter and nitrogen accumulation between plants, and (ii) the semi-perennial growth type that makes difficult to

asses the use and balance of fertiliser N on an annual basis without disturbing the re-growth of the new shoots.

We observed that N requirements varied according to banana growth cycle with higher N content in plants during the 1st growth cycle compared to the 4th growth cycle, which in agreement with an accompanying work that aims at determining the N requirements throughout the growth cycles (Thieuleux et al, submitted). We saw that the distribution of N in the various parts of the plants were fairly constant whatever the treatment, while on the other hand the way we managed the mother plants dramatically influenced the subsequent growth and n uptake during the following year. Removing totally the mother plant as we did in the second experiment decreased dry matter production by a factor 2.5 and the net accumulation of N by a factor of 3 to 4.

Generally speaking the recovery of the added labelled N in banana crop was low compared to other crops (Strong, 1995), 20-30% of the added N , but which is still higher than the published data on banana crops –although very few data are available in the literature (i.e Murphy et al., 1998; Prasertsak, 2001). On Ban1, when label N was applied at floral differentiation, we observed that two-third of the fertiliser N recovered at harvest time, was already taken up at flowering time with an extra 12 % recovery between flowering and harvest. Also on Ban1, the recovery of fertiliser N was significantly higher for the fertiliser applied at floral differentiation (as measured in exp 1) that at flowering (as measured in exp 2) suggesting that N requirements were higher in the early phase of the growth cycle. These observations are in agreement with the work of several authors (Martin-Prével et al, 1966; Lassoudière, 1978 and Thieuleux et al., submitted), showing the dynamics of banana plant dry matter and nitrogen consumption increasing quickly from floral differentiation until flowering, then slowing down until harvest.

When comparing the fate of the label fertiliser applied at a single date (flowering) for Ban1 and Ban4, we did not observe any difference in the recovery of labelled N in plant, while the total accumulation of N was different. It suggests again tha most of the difference between the two crop cycles was established earlier than during the flowering-harvest period (and therefore differences were established from previous unlabelled fertiliser application and soil N). These data confirm (i) the low recovery of fertiliser application, which represented about 20-30% of the added fertiliser and for the conditions of the present investigation about only 10% of the total N accumulated in plant, but (ii) the response to the date of application. This is in agreement with previous findings on annual crops (e.g wheat) where date of application

was found to be a major factor that influences the recovery of fertiliser N in plant (Recous *et al.*, 1999 ; Humphreys *et al.*, 1987).

The second experiment aimed to quantify processes that compete with plant uptake for the added nitrogen. The recovery of label fertiliser in plant was similar for Ban1 and Ban4 as discussed earlier, although the dynamics of fertiliser N in soil was very different during the 45 days following application. Under Ban1 a faster drainage of the added N was observed down the soil profile. The immobilization of fertiliser N in soil was fast and did not change significantly over time which was also observed by Recous and Machet (1999) under wheat crop. However the immobilization of label N was twice under Ban4 compared to Ban1 (35-40% versus 20%). We hypothesize that this difference between the young and the old banana plantations were due to a higher C availability in Ban4, associated to the return of crop residues during 4 years without any soil tillage. As the total recovery in the soil-plant system was higher with higher N immobilization, this suggests that N immobilization prevents the unused N left by the crop from being lost from the system by leaching. Contrary to the gas and nitrate losses nitrogen under organic form does not leave the soil-plant system and can be partially remineralised, at a rate and in a proportion which it is important to predict. Based on the harvest of the second year (Ban1*), we found that an extra 6% of the added N was taken up during the second year.

The fast disappearance of mineral N soil and uncompleted recovery may therefore be attributed to nitrate leaching. Indeed the application of labelled urea under liquid for at the bottom of the plants and the soil acidity (pH between 4.2 and 5.3), which are not favourable for volatilisation; let us consider that this phenomenon was negligible, according to Sierra and Marban (2000).

For Ban1, the absence of stumps from previous cycle, and crop residues lefts at the soil surface seems to be an important factor to explain the differences in mineral nitrogen dynamics and nitrogen immobilisation between the two treatments. Indeed, a recent work (Cattan *et al.*, 2005) showed the importance of a mulch of banana residues covering the soil in the contrasted run off observed between a first cycle and subsequent cycle in case of a soil with a high water infiltration capacity under banana plantations. In our study, for a fertiliser supply at flowering, dynamics of N mineral from fertiliser under banana plantations in Nitisol seems more dependent on the hydrodynamics properties of the soil and biological activity from stumps and crop residues decomposition than on the crop N demand. In our conditions where N mineral N seemed to be largely in excess of microbial+plant demands, the rate of fertiliser N application was the first factor influencing the recovery of fertiliser in plat, while

the management of crop growth and its residue, influenced the competition between other processes in soil.

Conclusion

Our data obtained with labelled ^{15}N fertilisers confirm the low recovery of fertiliser N observed by banana crops (Prasertak, 2001). These results mainly from an excess of fertilisation compared to plant N requirements combined with an important risk of nitrate leaching due to excess water in soil. The responses to the date of application of fertiliser and to the crop growth cycle to which fertiliser is applied suggest that there is a potential for improving fertiliser use by plant, by matching closely fertiliser application with crop N demand, as it has been proposed for other crops (e.g. Limaux et al., 1999). For banana plantations, it means adjusting fertilisation to the crop growth cycle of banana (1st crop cycle > other cycles) and throughout each crop cycle according to nitrogen dilution curve (Thieuleux et al., submitted).

It appeared that microbial immobilisation is a process that affects significantly the fate of fertiliser applied and consequently the overall mineralisation-immobilisation turnover. The immobilisation potential in banana plantation can be manipulated by the amount, quantity and localisation of the crop residues returning to the soil, as shown by the comparison of Ban1 (removed residues) and Ban4 (added residues). Also the residues themselves contain about half the nitrogen accumulated during each crop cycle. Further improvements of N management in banana plantation imply to quantify the mineralisation of the soil organic matter and the decomposition of crop residues, and their synchrony with banana N requirements.

11.2 DECOMPOSITION DES RESIDUS DE CULTURE

11.2.1 Démarche expérimentale

Une étude en 3 étapes nous a permis de caractériser et de quantifier la fourniture d'azote issue de la décomposition des résidus de cultures dans le système nitisol-bananeraie. La première étape est une évaluation du potentiel de minéralisation des différents organes du bananier en laboratoire à température et humidité constante, la seconde étape est une estimation de cette décomposition *in situ*, et la troisième a consisté à mesurer l'absorption par la culture de l'azote minéral issu de la décomposition des résidus en utilisant le traçage isotopique du ^{15}N . Le sous-modèle de décomposition des résidus de STICS 5.0 a été paramétré pour prédire les cinétiques de décomposition obtenues au laboratoire et au champ.

Etape 1 : Incubation en laboratoire à température et humidité constantes

Les organes du bananier considérés ont été les feuilles (limbes + pétioles-nervures), les pseudotroncs, et les racines. Ces échantillons de plante ont été prélevés au stade récolte du premier cycle cultural en janvier 2004. Les caractéristiques biochimiques (teneurs en cellulose, hémicellulose, lignine et carbone soluble) des différents organes ont été déterminées par la méthode Van Soest (1963) à partir d'échantillons séchés et broyés. Les teneurs totales en C et N ont été mesurées à l'aide d'un analyseur élémentaire, notamment pour permettre le paramétrage du modèle STICS (le rapport C/N est le facteur d'entrée) pour prédire la dégradation des résidus de culture.

Les résidus de bananier séchés au préalable à l'étuve (fragments découpés aux ciseaux de 0,5 à 1 cm de long,) ⁴ ainsi que du glucose (indicateur de l'activité biologique du sol), ont été mis séparément en présence de sol brun rouille à halloysite à la capacité au champ (35% d'humidité). Trois répétitions par échantillon ont été réalisées (420 mg de résidus + 20g de sol sec) et mis dans un bocal de 0,5 l avec un pilulier d'eau pour garder le taux d'humidité constant dans l'air du bocal (Fi23A), et un pilulier de soude pour capter le CO_2 émis. Par ailleurs, trois répétitions par traitement ont été mis dans un bocal de 2l avec un pilulier d'eau pour le dosage d'azote minéral (Fig.23B).

⁴ Le diamètre des racines et des nervures des feuilles étaient d'environ respectivement ; l'épaisseur des stipes et des limbes étaient d'environ ...respectivement.



Figure 23. Incubation au laboratoire de résidus de bananiers

- A/ Traitement résidus + sol dans un bocal de 0,5 litre, pour le dosage de CO_2
 B/ Bocaux de 2 litres pour le dosage de N minéral
 C/ Témoin (sol + piluliers)
 D/ Blanc (piluliers seuls)

Tous ces bocaux ont été placés à l'étuve à 25°C pendant 101 jours. A chaque pas de temps (11 dates), 3 répétitions de chaque traitement ont été mesurées pour évaluer la quantité d'azote minéral dans le sol (colorimétrie AutoAnalyseurII - Technicon) et la quantité de CO_2 dégagé (titrimétrie).

Etape 2 : Incubation *in situ*

Nous avons utilisé 24 tubes en PVC (6 dates * 4 répétitions) qui ont été enfouis à 25 cm de profondeur dans le sol (fig.24). Des résidus découpés en morceaux de 5 cm de long (36 g) ont été placés en surface des tubes ce qui équivaut à 6 tonnes de résidus à l'hectare. Le mélange de résidus apporté à la surface des tubes est au prorata des proportions des feuilles et des pseudotroncs du bananier, soit 20,3 g de pseudotroncs, 10,5 g de limbes, 5,2 g de pétioles et nervures.

Des capteurs de température (3 répétitions de thermocouples) ont été placés dans les tubes, sous le mulch, à 10 cm et 30 cm, et des capteurs d'humidité (3 répétitions de tensiomètres) ont été placés aux mêmes profondeurs dans le sol à proximité des tubes.

On récupère les résidus à la surface des tubes à l'aide d'un sac plastique en grattant légèrement la surface du sol, à 21, 51, 82, 111 et 141 jours après le début des incubations. Les résidus sont pesés en frais après tamisage pour éliminer la terre et les autres éléments (insectes, etc...) présents. Les échantillons sont séchés à l'étuve à 70°C pendant 24 à 48

heures. Les échantillons secs sont pesés, broyés et analysés pour déterminer la teneur en azote et carbone.



Figure 24. Dispositif expérimental de mesure in situ de la décomposition des résidus.

Étape 3 : Essai en parcelle expérimentale

Sur deux parcelles de 200m², les résidus ont été apportés à la surface du sol en mars 2004, dans des cadrats de 1m² au pied des bananiers (Fig.25).



Figure 25. Dispositif expérimental de mesure de l'efficacité des apports d'azote des résidus durant le cycle de culture 2004.

Pour ces essais en parcelle de 2^{ème} cycle de culture (Ban2 = Ban4), les apports d'engrais ont été supprimés pour permettre la mesure aisée du coefficient réel d'utilisation des résidus (CRU-R) marqués au ¹⁵N (excès de 0.982%). Des profils d'N minéral (0-60 cm) ont été réalisés à différentes dates ()

Quatre bananiers par parcelle ont été prélevés à la récolte (août 2004), découpés en 5 parties : limbes, pétioles-nervures, pseudotroncs, fruits, racines. Chaque partie a été pesée en frais, découpée de nouveau, puis un aliquote a été prélevé, pesé en frais, séché à l'étuve à 70 °C et pesé en sec. Les échantillons ont été analysés pour connaître leur excès isotopique en ^{15}N et leur teneur totale en N. Un profil d'azote minéral a été réalisé au moment de l'apport des résidus, puis à 2 dates intermédiaires et à la récolte. Pour chacune des 2 parcelles, 30 carottes élémentaires de sol sont mélangées pour avoir une teneur moyenne d'azote minéral à 0-10, 10-30 et 30-60 cm.

La pluviométrie, la température de l'air et du sol ont été mesurées au cours du cycle cultural grâce à une centrale de mesure placée sur la parcelle et à des capteurs de température et d'humidité (3 répétitions par parcelle) placés à 10 cm, 30 cm et 60 cm de profondeur dans le sol.

Modélisation

Les données obtenues lors des incubations au laboratoire et au champ ont été comparées aux prévisions du module de décomposition des résidus de STICS.

Description du module de décomposition de STICS

Ce module (Fig.26) a été paramétré et validé avec une large gamme d'espèces et de sols dont les cinétiques de décomposition ont été mesurées à différentes conditions de température et d'humidité (Nicolardot, 2001). Le module de décomposition du modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998) est basé sur 3 pools organiques : les résidus de cultures (R), la biomasse des décomposeurs associés (B) et la matière organiques humifiée (H).

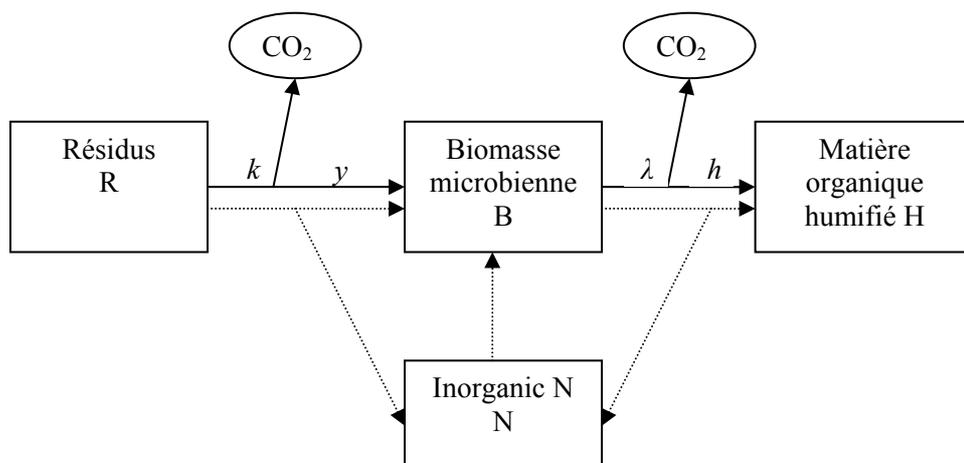


Figure 26. Schéma du module de décomposition des résidus de STICS

Les deux premiers pools sont supposés se dégrader selon une cinétique de premier ordre avec des taux constants k et λ (d^{-1}). Le carbone décomposé est soit minéralisé en CO_2 soit assimilé par la biomasse microbienne avec le coefficient de rendement Y ($\text{g C g}^{-1}\text{C}$). L'incorporation

directe des résidus dans le compartiment stable ainsi que la composition biochimique des résidus n'est pas considérée dans le modèle. La dégradation de la biomasse microbienne est supposée produire à la fois du C humifié et secondairement de la minéralisation du C dans les proportions de h et $1-h$, respectivement ($g\ C\ g^{-1}C$). En l'absence de limitation d'azote, le rapport C/N des 3 pools reste constant dans le temps. La dynamique de l'azote est gouvernée par le taux de C et le rapport C/N.

Le modèle est ainsi gouverné par 7 paramètres : 2 paramètres représentant des constantes de vitesse k et λ , 2 coefficients de partage (Y et h), et 3 rapport C/N (celui des résidus, celui de la biomasse et celui de l'humus). Les équations correspondantes sont décrites dans l'article Nicolardot (2001) ; la minéralisation du C et N de la matière organique du sol est considérée dans un autre compartiment indépendant du modèle STICS. Par conséquent, STICS ne considère pas le phénomène de « priming effect », c'est à dire l'effet que pourrait avoir la décomposition des résidus apportés sur la décomposition de la matière organique humifiée.

Quand la température et l'humidité sont constantes, le système peut être intégré, montrant que tous les pools de carbone et d'azote varient selon une cinétique de double exponentielle, excepté le pool des résidus qui diminue avec une cinétique exponentielle simple.

Les simulations

Les simulations de la décomposition des résidus de bananiers ont été réalisées à 25 °C et 35% d'humidité volumétrique (capacité au champ) et ont été comparées aux simulations ayant servi à la paramétrisation et à la validation de ce sous module, en utilisant comme critères de variabilité : la somme des carrés des écarts à la moyenne pour le carbone et l'azote SCE (C) et SCE (N), le « root mean square error » RMSE (C) et RMSE (N), équivalent à l'écartype, et l'écart relatif RR qui est la somme du SCE (C) et du SCE (N).

Pour améliorer les prédictions du modèle, un ajustement des paramètres a dû être réalisé en deux étapes : (i) la première a consisté à ajuster la SCE (C) en optimisant la valeurs des 7 paramètres en tenant compte des contraintes suivantes : h et k sont bornés entre 0,05 et 1 et Y est constante à 0,62, (ii) la seconde étape a consisté à ajuster le SCE (N) en optimisant les paramètres : C/N de la biomasse et C/N de l'humus.

Une valeur minimale de 0.05 a été assignée au coefficient d'humification h , puisque même pour des substrats très facilement décomposables comme le glucose ou la cellulose, on a observé des productions de substances humiques (e.g Sørensen, 1983). La constante Y a été calculé comme l'efficacité moyenne potentielle de l'assimilation carbonée des microorganismes durant leur croissance prototrophique (Payne et Wiebe, 1970).

11.2.2 Résultats et Discussion

11.3.3.1 Caractéristiques biochimiques des résidus de bananiers

Le rapport C/N des feuilles (mélange composé de limbes et de pétioles et nervures) est le plus faible parmi ceux de tous les organes considérés, suit le C/N des racines qui est relativement proche et celui des pseudotroncs ou pseudotroncs qui représente le double des précédents (Tab.9). Les résidus du bananier sont composés principalement d'hémicellulose, de cellulose et de carbone soluble. Ces éléments représentent 85 à 95 % de la part organique des organes considérés. Il existe cependant des différences dans la composition biochimique des différents organes. Les pseudotroncs ont la plus importante teneur en carbone soluble (30 % de la part organique) ce qui représente deux fois la part organique des feuilles et six fois celle des racines. En considérant l'hémicellulose et la cellulose, les pseudotroncs ont les taux les plus élevés, alors que les feuilles et les racines ont des teneurs similaires. La teneur en lignine des pseudotroncs est la valeur la plus faible des organes considérés, et elle représente la moitié de celle des feuilles et des racines.

Tableau 9. Caractéristiques biochimiques des organes du bananier

Le carbone soluble C1 a été mesuré à partir d'une extraction Van Soest. L'azote et le carbone et soluble C2 à partir d'une extraction à l'eau. Les valeurs sont exprimées en % de la matière sèche sauf le rapport C/N

	C	N	C/N	C soluble	Hemicellulose	Cellulose	Lignine
Feuilles	43.9	2.15	20.4	27.49	20.23	25.50	13.20
Pseudotroncs	39.1	0.81	48.3	14.69	30.46	32.24	5.60
Racines	38.7	1.47	26.3	7.25	36.49	30.67	13.15

Dans la base de données internationale ORD⁵ (Organic Resource Database, version 4.0, 2002), il y a quelques valeurs concernant la composition biochimique totale du bananier provenant de communications personnelles (Bunyasi, 1997) aux auteurs de la base (Adams E, University of London et Gachengo C., TSBF Nairobi, 1997).

Dans cette base de données, le pourcentage d'azote du bananier est de 1,3. Les valeurs de cellulose plus la lignine sont de 44,26 %, 11,99% pour la lignine. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues à partir des résidus de bananiers analysés dans cette étude mais aucune donnée n'est disponible sur la décomposition des résidus.

⁵ ORD est un outil de recherche pour l'étude de la composition et de la décomposition des plantes tropicales et sub-tropicales consommées ou utilisées pour la conservation du sol. Le but de cette base de données est de collecter les données générées par la recherche et de déterminer des relations entre les paramètres de qualité des résidus de culture et leur décomposition. Cette base, encore en développement, pourra être utilisée comme source de données pour la modélisation utilisant des plateformes CENTURY ou STELLA.

II.3.3.2 Cinétique de décomposition et apport d'azote potentiel au système

Incubation au laboratoire

Le glucose, décomposé à 74,6 % au bout de 84 jours, indique que les conditions de température et d'humidité des incubations sont favorables à une bonne activité de la microflore du sol (Fig.27A). La vitesse de décomposition des résidus ralentit vers le 40^{ème} jour d'incubation. Le pourcentage de carbone des pseudotrons qui est décomposé plafonne à 40,1 % alors que pour les feuilles et les racines, ce pourcentage est respectivement de 27,4 et 23,6 %. Ce résultat était plutôt inattendu compte tenu du rapport C/N des résidus. Il devient cohérent quand on le compare aux teneurs en lignine, hémicellulose, cellulose et carbone soluble des résidus. Les pseudotrons qui libèrent 40% de carbone possèdent la teneur en lignine la plus faible et les plus importants pourcentages de cellulose et d'hémicellulose.

En ce qui concerne l'azote minéral, la décomposition des feuilles de bananiers (Fig.27B) est composée de 2 étapes : une courte phase d'immobilisation de l'azote du sol jusqu'au 7^{ème} jour puis une minéralisation qui restitue environ 44 % de l'azote apporté ($209.6 \pm 9.9 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote minéral) au 45^{ème} jour d'incubation (la moyenne des restitutions d'N est réalisée sur les 4 dernières dates correspondant au plateau de la cinétique). Les racines immobilisent l'azote minéral présent dans le milieu au cours des 40 premiers jours d'incubation puis il y a une phase de minéralisation qui permet une restitution au milieu de 23% de l'azote apporté ($60,8 \pm 14,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote minéral). Les pseudotrons ont une cinétique de décomposition différente de celles des 2 organes précédents, aucune phase d'immobilisation n'est observée, la minéralisation nette positive commence dès le 2^{ème} jour d'incubation et la restitution de 92% de l'azote apporté ($162.6 \pm 26.2 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote minéral), quantité absolue légèrement plus faible que celle observée pour les feuilles.

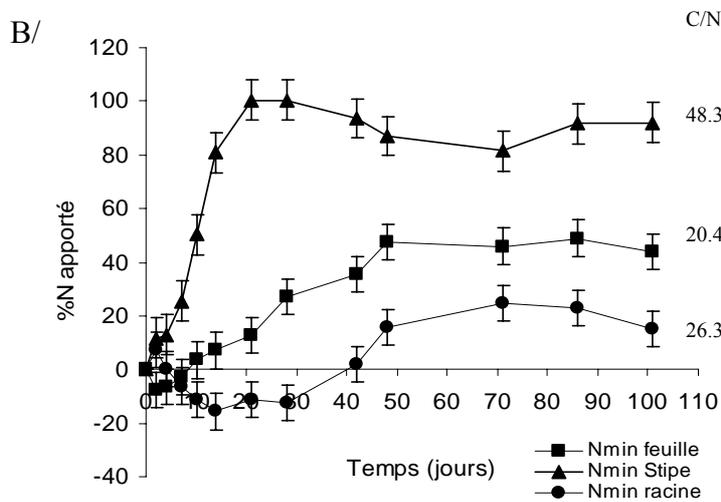
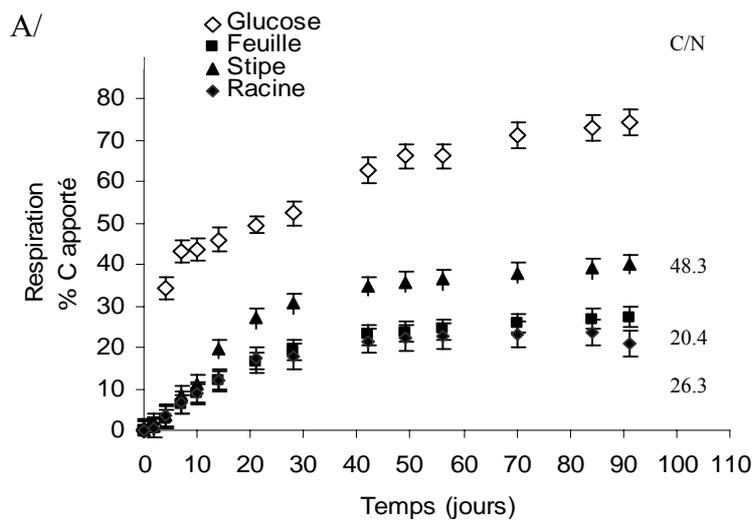


Figure 27. Cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers

A/ libération de CO_2 au cours de 91 jours d'incubation

B/ Variations des teneurs en N minéral du sol par rapport au sol témoin sans apport de résidus pendant 101 jours d'incubation.

Le tableau 10 présente les calculs réalisés à partir des teneurs en C et N reconstituées des résidus. Ces valeurs sont issues de la différence entre les quantités de C et N initiaux des organes et les quantités de C respirées à J 91 et de N minéralisées à J 101.

Ce tableau montre que le C/N de la partie des résidus non respirés est plus élevé que le C/N initial des résidus pour les feuilles et les pseudotrons (dans ce dernier cas environ dix fois supérieur). Dans le cas des racines, c'est l'inverse

qui est observé, le C/N restant est plus faible.

Tableau 10. Rapport C/N des résidus à la fin de l'incubation

	% C	% N	C/N	C/N initial
Feuille	72.6	56.2	26.5	20.5
Pseudotrunc	59.9	7.9	364.6	48.4
Racine	76.4	84.9	23.6	26.2

Ces observations montrent qu'il y a une divergence des valeurs relatives de C et N des résidus entrant dans le compartiment humus. Dans le cas des pseudotrons et des feuilles, le carbone entre en plus grande quantité que l'azote dans l'humus, ainsi l'azote libéré est disponible pour la culture.

Incubation *in situ*

Température et humidité du sol

La figure 28 présente les températures du sol du 28/04/04 au 17/05/04. Durant la période considérée, alors que les températures dans l'air oscillaient entre 26.2 et 27.5°C, les températures sous mulch et dans le sol ont variés de 24.6 à 26.1 °C. Les amplitudes de variations étaient les plus importantes sous le mulch et à 10 cm de profondeur (respectivement 2.4 et 1.8 °C). Ces amplitudes diminuaient fortement avec la profondeur dès 30 cm (0.87 °C). Ainsi la température à 60 cm de profondeur était relativement stable (amplitude de 0.45°C).

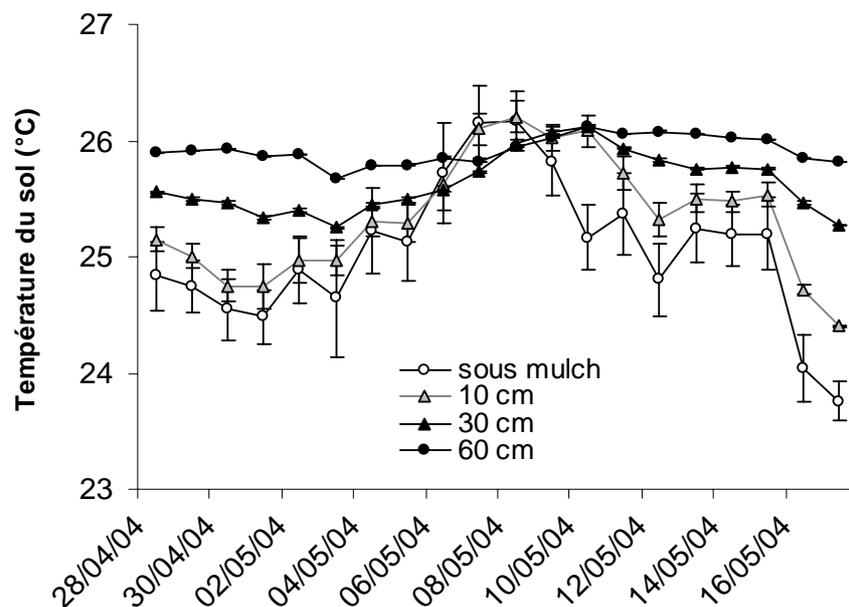


Figure 28. Variations de température sous le mulch et dans le sol durant la décomposition des résidus de culture (période du 28/04/04 au 17/05/04)

La relation exponentielle illustrée par le graphique 29 suivant décrit les corrélations entre la profondeur du nitisol (entre 0 et 60 cm) et l'amplitude thermique sous bananeraie.

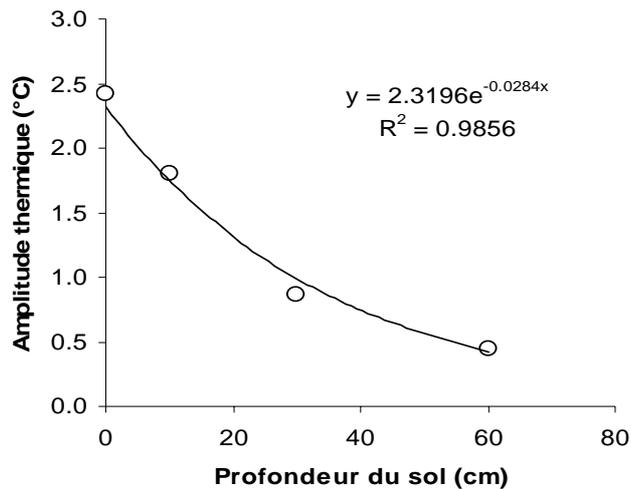


Figure 29. Relation exponentielle décroissante de l'amplitude thermique avec la profondeur de sol (Illustration du nitisol sous bananeraie)

La biomasse des résidus placés à la surface du sol des tubes en PVC (36g) devient quasiment nulle en 141 jours (Tab.11). Il est important de noter ici que le rapport C/N des résidus restants est constant au cours de la décomposition. Le rapport C/N des résidus reste constant tout au long de leur décomposition (Tab.11). En parallèle à la perte de poids des résidus on observe une diminution du pourcentage de la teneur des résidus en carbone et en azote jusqu'au 82^{ème} jour puis une augmentation des taux aux 2 dernières dates. La diminution des teneurs correspond à la perte en C et en N respirés ou humifiés. On peut faire l'hypothèse que l'augmentation du rapport C/N des résidus en fin d'incubation serait due à une augmentation des teneurs alors que les résidus ont presque disparu correspond à une concentration de ces composés dans la partie non labile (contenant des éléments tel que le fer) des résidus qui formera l'humus.

Tableau 11. Décomposition des résidus *in situ*

MS : matière sèche exprimée en poids (g) et en pourcentage de l'apport initial

%N et %C et C/N sont les contenus en N, C et le rapport de ces éléments dans les résidus restants à la surface des tubes à chaque pas de temps.

(Moyenne MS en poids ± erreur standard)

Jours	MS		%MS	%N	%C	C/N
0	36.02	± 3.38	100	1.51	32.21	21.30
21	34.16	± 3.39	95	1.00	20.82	20.88
51	32.77	± 3.89	91	0.59	12.15	20.50
82	20.35	± 9.56	57	0.55	11.38	20.69
111	4.73	± 2.32	13	0.58	12.28	21.10
141	0.65	± 0.32	2	1.12	24.08	21.59

Dans la figure 30, la diminution des pourcentages de C et N initial au cours de la décomposition est décrite par l'exponentielle suivante :

$$\%C \text{ ou } \%N = 100 \exp^{-0.029 \text{ jour}}$$

(2)

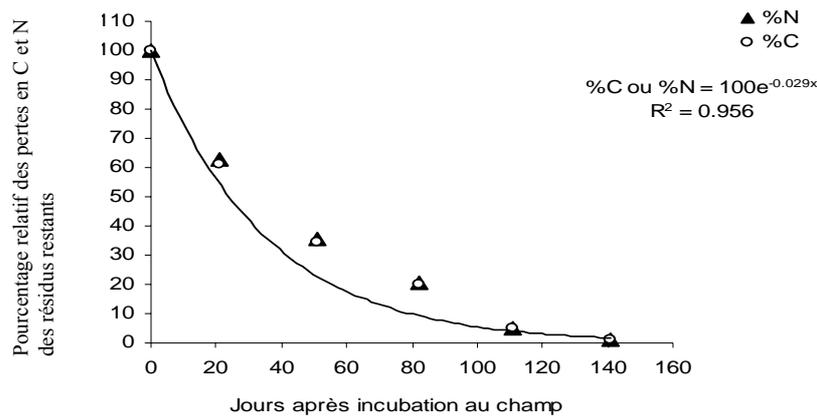


Figure 30. Pourcentage de pertes relatives en C et N des résidus restants (décomposition *in situ*)
Modélisation des pertes en C et N par une exponentielle.

II.3.3.3 Modélisation de la minéralisation des résidus de bananier par le sous-module de STICS

Observations des simulations brutes (données incubation au laboratoire)

Les données observées lors des incubations en laboratoire et *in situ* ont été comparées aux sorties du sous module de décomposition des résidus de STICS. Les résultats obtenus montrent que bien que l'allure des courbes de respiration sont similaire, le module surestime les cinétiques de dégagement du CO₂ pour les 3 types de résidus. En ce qui concerne les variations d'azote minéral liées à la décomposition des feuilles, le modèle simule une phase d'organisation puis de reminéralisation mais plus faible que celle observée. Pour les pseudotroncs et les racines, le modèle simule uniquement une phase d'organisation alors que dans les 2 cas des phases de minéralisation sont observées, dès le 7^{ème} jours pour les pseudotroncs et à partir du 45^{ème} jour pour les racines (Fig.31).

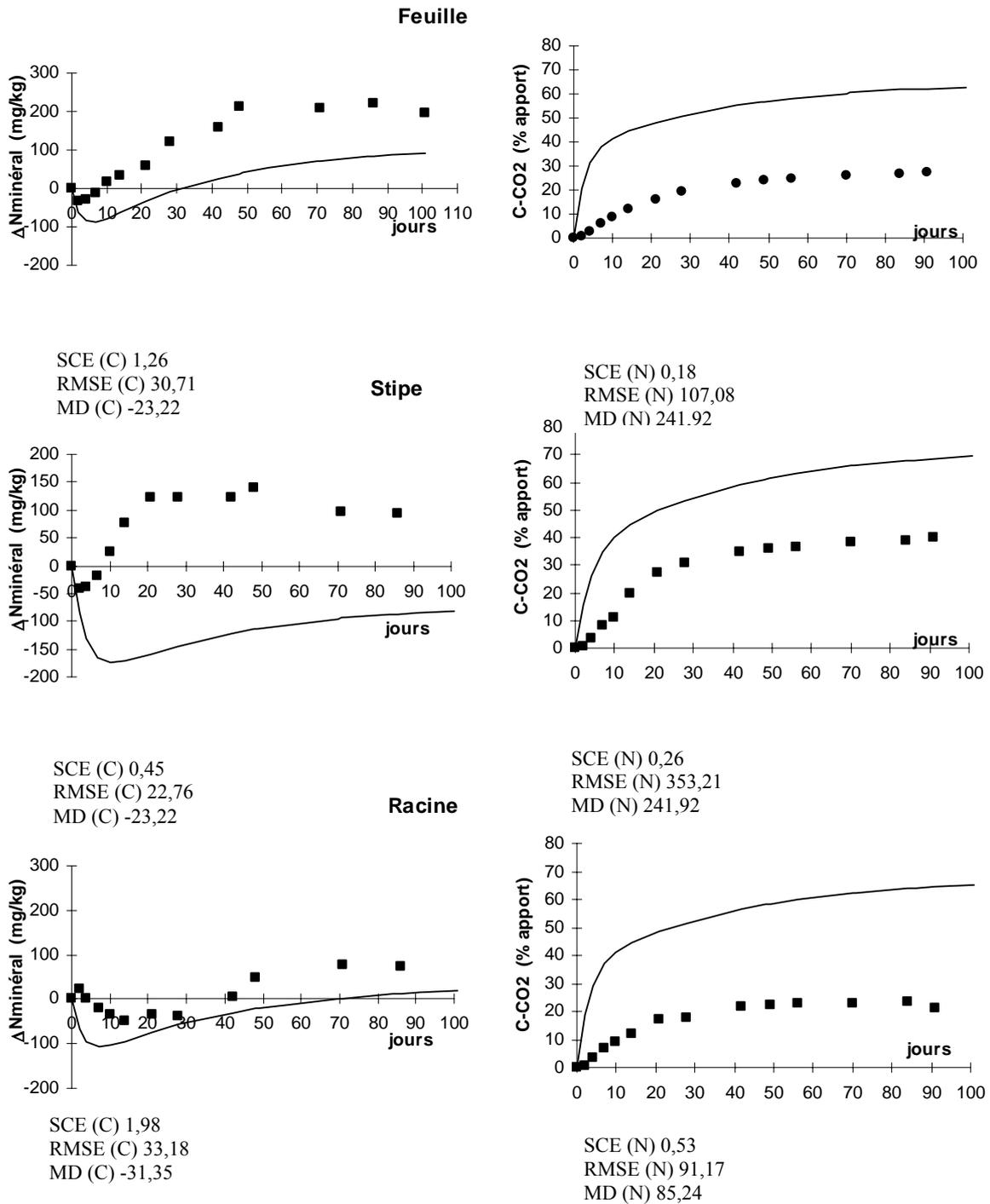


Figure 31. Simulations des cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus)

SCE (C) : somme des carrés des écarts à la moyenne pour le carbone

SCE (N) : somme des carrés des écarts à la moyenne pour l'azote

RMSE (C) : écartype pour le carbone

RMSE (N) : écartype pour l'azote

MD (C) : différence moyenne pour le carbone

MD (N) : différence moyenne pour l'azote

Observations des simulations après ajustement

L'ajustement des paramètres permet une meilleure simulation par le modèle des cinétiques de décomposition des résidus de bananiers (Fig.32). Cependant la forme et l'amplitude des

cinétiques simulées demeurent insatisfaisantes particulièrement dans le cas de l'azote pour les pseudotroncs et du carbone pour les racines.

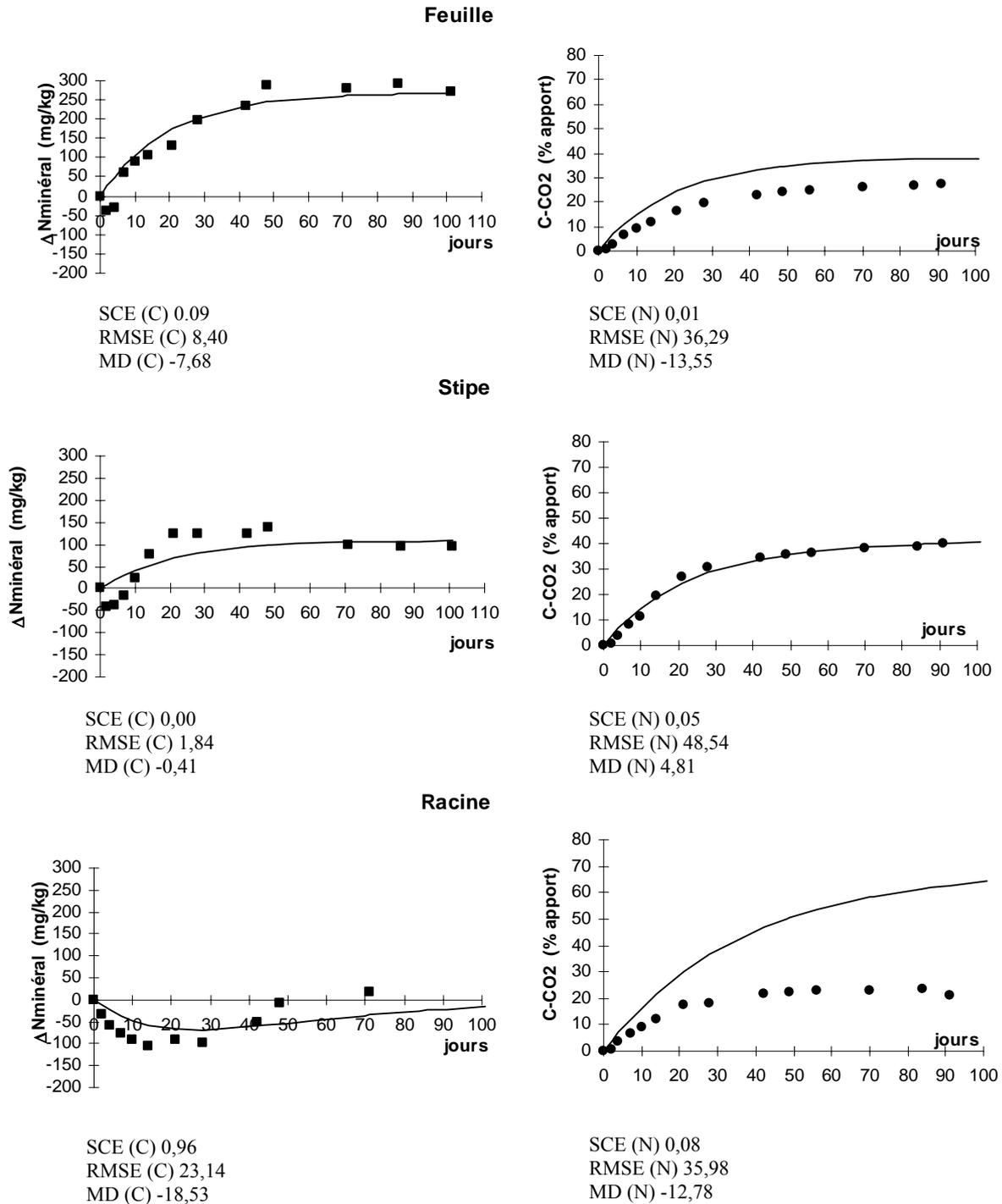


Figure 32. Ajustements des simulations des cinétiques de minéralisation des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus) avec ajustement

SCE (C) : somme des carrés des écarts à la moyenne pour le carbone
SCE (N) : somme des carrés des écarts à la moyenne pour l'azote
RMSE (C) : écartype pour le carbone
RMSE (N) : écartype pour l'azote
MD (C) : différence moyenne pour le carbone
MD (N) : différence moyenne pour l'azote

Simulations des cinétiques observées au champ

Dans ce paragraphe, on réalise une simulation avec le module STICS pour évaluer sur les 270 jours du cycle le synchronisme minéralisation-absorption de la culture. Pour ce faire, on utilise les données de CO₂ et d'azote minéral mesurées pour les pseudotrones et les feuilles lors des incubations au laboratoire qu'on transforme en données « mélange de résidus » selon le prorata de ces organes dans le bananier. Les paramètres obtenus après simulation simple avec le modèle sont très différents de ceux observés pour les résidus ayant servis à la calibration et à la validation du modèle.

On optimise donc les prévisions du modèle pour les cinétiques d'azote minéral (Fig.33), en fixant le paramètre **k** à la valeur mesurée lors des incubations au champ (0,029), ainsi que le paramètre **y** (0.62) lié au fonctionnement de la biomasse microbienne Nicolardot (2001). Seuls les paramètres λ et **h** sont ajustés et ont ainsi une valeur empirique.

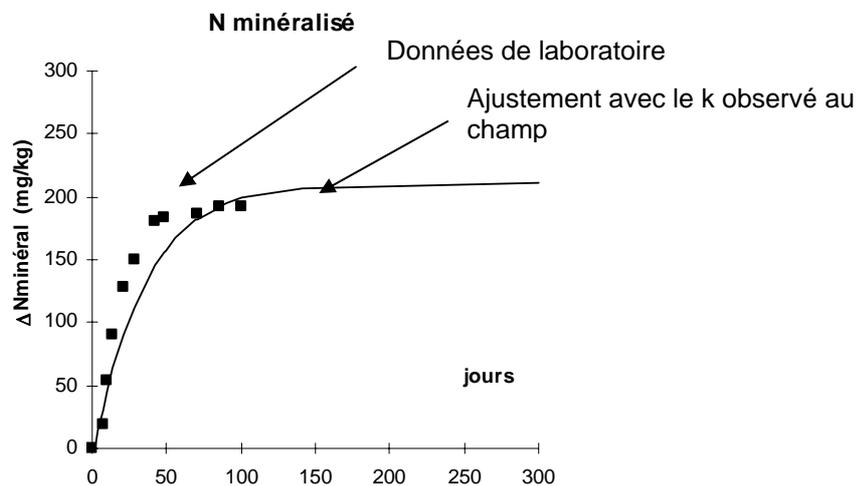


Figure 33. Ajustements des simulations des cinétiques de minéralisation *in situ* des résidus de bananiers par STICS 5.0 (sous module de décomposition des résidus)

Ces ajustements nous permettent de raisonner sur le synchronisme de la libération de l'azote par les résidus et la disponibilité de l'azote pour la culture au cours du cycle. On observe que 65% de l'azote des résidus sont libérés en 50 jours environ. Les résidus sont apportés à la récolte, à un moment où de par les nouvelles pratiques culturales (oeilletonnage précoce), ils sont de plus en plus proches de la différenciation florale (100 jours), c'est à dire proches de leur phase d'absorption maximale de l'azote. Ainsi l'offre en azote des résidus de culture serait synchronisée avec une demande accrue de la culture.

Discussion

La modélisation des cinétiques de décomposition des organes du bananier par le sous module STICS n'est pas satisfaisante. La seule prise en compte du facteur C/N pour prédire les

cinétiques de décomposition des résidus pose problème dans le cas de résidus comme les pseudotroncs ayant un C/N élevé et qui ont par ailleurs, un faible pourcentage de lignine et une part importante de carbone soluble. La figure 34 montre des corrélations significatives entre la teneur en lignine des organes considérés et le pourcentage de CO₂ émis et entre la teneur en lignine et en carbone soluble et le pourcentage de d'azote minéral libéré.

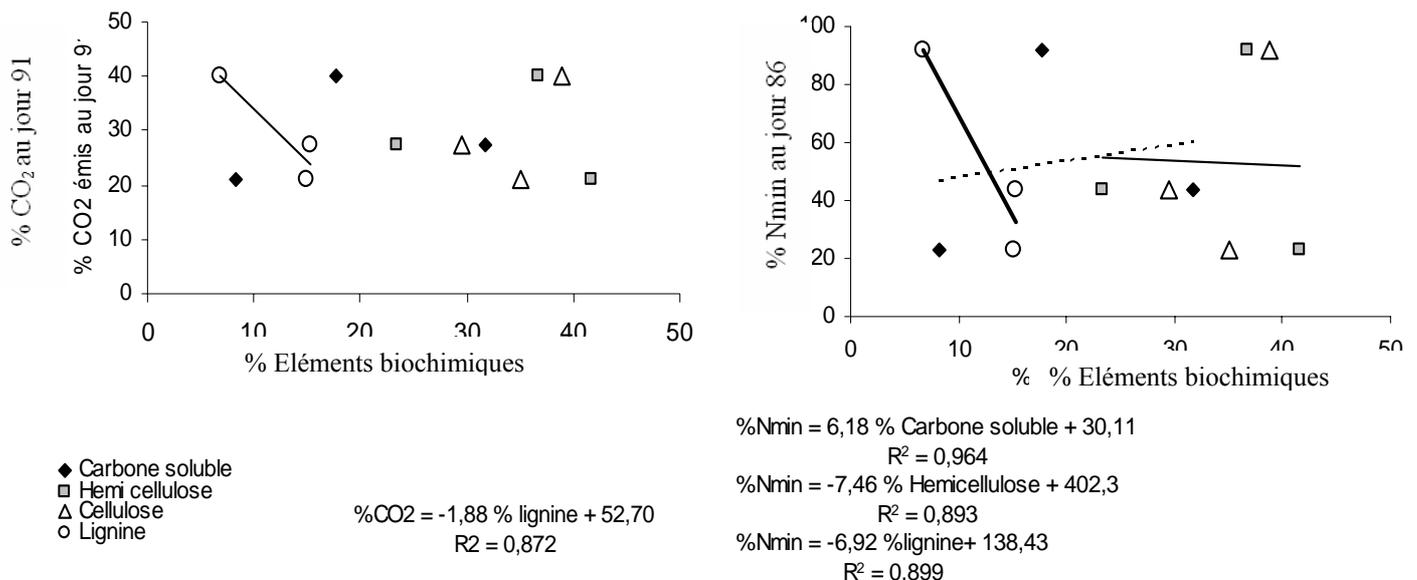


Figure 34. Relation entre %N (A) et % C (B) des organes du bananiers et les % de carbone soluble, hémicellulose, cellulose et lignine

Ces corrélations ouvrent donc des pistes pour des prédictions de la décomposition des résidus par d'autres caractéristiques que le seul rapport C/N. La lignine semble être l'élément le plus déterminant pour expliquer les teneurs de CO₂ émise ainsi que la libération d'azote minéral lors de la décomposition des résidus de cultures bananières.

Les prévisions de la minéralisation des résidus au laboratoire et au champ ne sont pas parfaitement superposables. En effet, les estimations de la décomposition des résidus au champ n'ayant pas considéré les dégagements de CO₂ et la libération d'azote minéral (difficiles à mesurer au champ) mais les pertes en matière sèche et le pourcentage de C et N restant, il est difficile de comparer strictement les vitesses de décomposition, ceci d'autant plus que le modèle ne prédit pas correctement les cinétiques obtenues au laboratoire, et donc ne permet pas d'estimer les constantes k du laboratoire.

Les produits apportés au champ semblent avoir des vitesses de décomposition plus lentes que celles observées au laboratoire. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ces écarts : l'effet de l'humidité, du pH et de la température induit par le mulch (Bussière et

Cellier, 1994) par rapport aux résidus enfouis ou l'effet des conditions de contact induit par les conditions sus-citées. Les résidus enfouis auraient ainsi une décomposition plus rapide que ceux restés en surface du sol. Ces hypothèses devraient être vérifiées de façon expérimentale pour identifier des facteurs de corrélations permettant de superposer les cinétiques de minéralisation obtenues au laboratoire à celles du champ.

II.3.3.4 Alimentation de la plante à partir de l'azote issu de la décomposition des résidus

Pluviométrie et azote minéral du sol au cours du cycle

Les teneurs en azote minéral dans le sol (0-60cm) étaient très élevées en début de cycle cultural (143 kg.ha⁻¹), puis elles se sont maintenues dans le sol autour de 10 kg.ha⁻¹ après la floraison. Le cycle cultural a débuté en saison sèche et s'est poursuivi en saison humide comme en témoigne les pluviométries moyennes mensuelles (Fig.35).

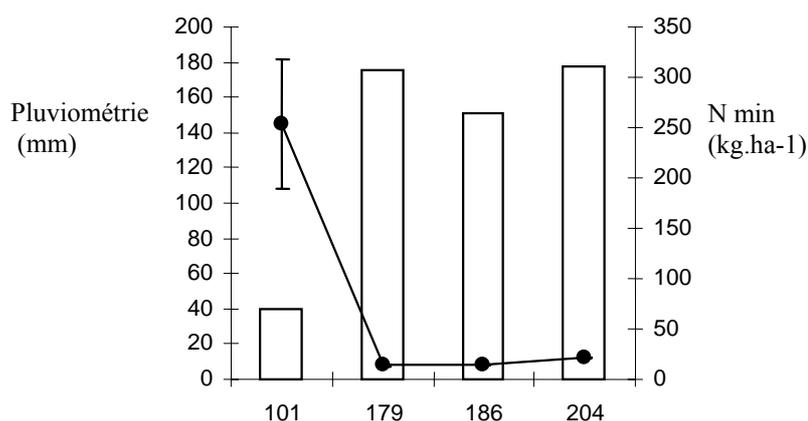


Figure 35. Pluviométrie et azote minéral dans le sol (0-60 cm) après les apports de résidus de cultures (cycle2)

La pluviométrie moyenne mensuelle (mai, juin, juillet, août).
Le temps est exprimé en jours après la récolte 1 (16 janvier 2004).
□ représente la pluviométrie ● représente l'azote minéral

Répartition et recouvrement de l'azote des résidus dans les divers organes du bananier

Les rendements obtenus sur ces parcelles de 2^{ème} cycle non fertilisées sont comparables aux rendements obtenus l'année précédente pour le traitement Ban4 à savoir 60 t.ha⁻¹.

La répartition de la matière sèche et de l'azote dans les plantes à la récolte sont présentées dans le tableau 12. Le pseudotrunc et le régime constituent l'essentiel de la matière sèche de la plante. Les racines ont la plus faible richesse isotopique et les pétioles et les nervures la plus élevée. Les pseudotrons, les limbes et les fruits ont des excès isotopiques intermédiaires. La majorité du ¹⁵ N, apporté par les résidus, se retrouve dans les fruits, les limbes et les pseudotrons. Les pétioles et les nervures, ainsi que les racines, sont les organes où le taux de recouvrement de l'azote des résidus est le plus faible.

Tableau 12. Matière sèche, teneur en N total, azote 15, et efficacité de l'N des résidus

	Matière sèche (kg)	Total N (g/kg)	Total ¹⁵ N (g/kg)	CRU (%)
Limbes	1.96 ± 0.37	17.0 ± 1.9	0.00095 ± 0.0003	19.6 ± 8.6
Petiole-nervures	1.19 ± 0.30	4.9 ± 0.5	0.00035 ± 0.0001	4.4 ± 1.8
Pseudotroncs	5.54 ± 1.57	4.9 ± 0.6	0.00032 ± 0.0001	18.3 ± 6.7
Racines	0.12 ± 0.03	9.1 ± 1.2	0.00043 ± 0.0002	0.5 ± 0.3
Fruits	5.62 ± 0.95	7.3 ± 1.0	0.00045 ± 0.0001	25.9 ± 5.4

Au regard de la croissance en matière sèche du bananier (voir chapitre suivant) et de la loi de dilution de l'azote (Ulrich, 1952 ; Salette et Lemaire, 1981), il apparaît évident que pour obtenir un taux de recouvrement de l'azote apporté dans les fruits aussi important et supérieur aux autres organes, il est nécessaire que les bananiers aient absorbé cet azote disponible tôt dans le cycle pour permettre un transfert important de cet azote vers le régime en formation (remobilisation), période où l'absorption d'azote par la plante ralentit fortement.

Bilan de l'apport de résidus marqués à l'azote 15

Nous avons pu noter visuellement à la récolte que les résidus apportés se sont dégradés complètement au cours de ce cycle cultural. Le taux de recouvrement de l'azote (Tab.13) provenant de leur décomposition dans la culture est de l'ordre de 70%. Environ 5 % de l'azote des résidus sont retrouvés dans le sol entre 0 et 60 cm de profondeur. Le taux de recouvrement total de l'engrais est donc de 75%, le défaut de bilan pouvant être attribué à des pertes par lixiviation (25%).

Tableau 13. Bilan ¹⁵N résidus

% de ¹⁵ N des résidus	Moyenne	Ecart type
Total plante	68.7	± 8.6
Total sol (0-60 cm)	5.0	± 1.3
Somme	73.7	± 8.6

Le recouvrement important de l'azote des résidus dans la plante à la récolte s'explique d'une part, par la rapide disponibilité de l'azote des résidus et d'autre part, par le stade de leur croissance où se trouvent les plantes, c'est-à-dire à un stade de plus en plus proche de la différenciation florale et donc de leur phase maximale d'absorption de l'azote.

II.3.4 Conclusion

L'étude de la décomposition des résidus de bananier a permis de mettre en évidence deux points essentiels :

- L'azote des résidus en décomposition au cours du cycle cultural est absorbé par la culture en place. Cet azote est rapidement disponible pour les rejets à un stade proche de la différenciation florale.
- Dans le cas des résidus de la culture bananière, on ne parvient pas à modéliser la décomposition des résidus en prenant en compte seulement le rapport C/N. Il semblerait qu'une des limitations du modèle vient du fait qu'il maintient constant le rapport C/N du sol, alors que nous avons observé en laboratoire que le rapport C/N des résidus entrant dans ce compartiment peut être beaucoup plus élevé que le rapport C/N du sol et donc que ce dernier pourrait varier. La divergence des cinétiques de C et N serait donc une voie à explorer pour améliorer les prédictions du modèle.

Initialement, **la modélisation dynamique de la minéralisation** avait été choisie dans un objectif de prédiction ; elle a finalement été plutôt utilisée pour tester les hypothèses du modèle, permettant la prédiction de la minéralisation d'une large gamme de résidus de culture, mais qui ne semble pas validée dans le cas des résidus de bananiers.

Ces travaux montrent ainsi la nécessité de prendre en compte dans les modèles de prévision de la décomposition des résidus, la composition biochimique de ces derniers, comme cela a été proposé par certains auteurs (Molina *et al.*, 1983 ; Garnier *et al.*, 2001; Corbeels *et al.*, 2003 ; Bertrand *et al.*, 2004). Pour vérifier nos hypothèses et tenter de comprendre l'influence des divers composés biochimiques sur les cinétiques de décomposition des différents organes du bananier, des expérimentations plus approfondies au laboratoire et au champ (mesure du CO₂ respiré et profil d'azote minéral à chaque pas de temps *in situ*) sont nécessaires, ainsi que l'évaluation d'autres modules de décomposition des résidus tel que CANTIS (Garnier *et al.*, 2001) du modèle PASTIS, qui considère 5 pools organiques dans le système sol-paillis.

II.4 LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION ET RUISSELLEMENT

II.4.1 Démarche expérimentale

Le lessivage

Pour quantifier les pertes d'azote par lixiviation selon les cycles culturaux contrastés, nous avons utilisé la technique de la lysimétrie couramment utilisée pour ce type de mesures (Sansoulet, 2002). Le lysimètre conique à mèche (Fig.36) est un collecteur d'eau de percolation respectueux de l'organisation des pores du sol et suffisamment représentatif des flux d'infiltration sous un bananier, à travers sa zone racinaire ou couche du sol non remanié.

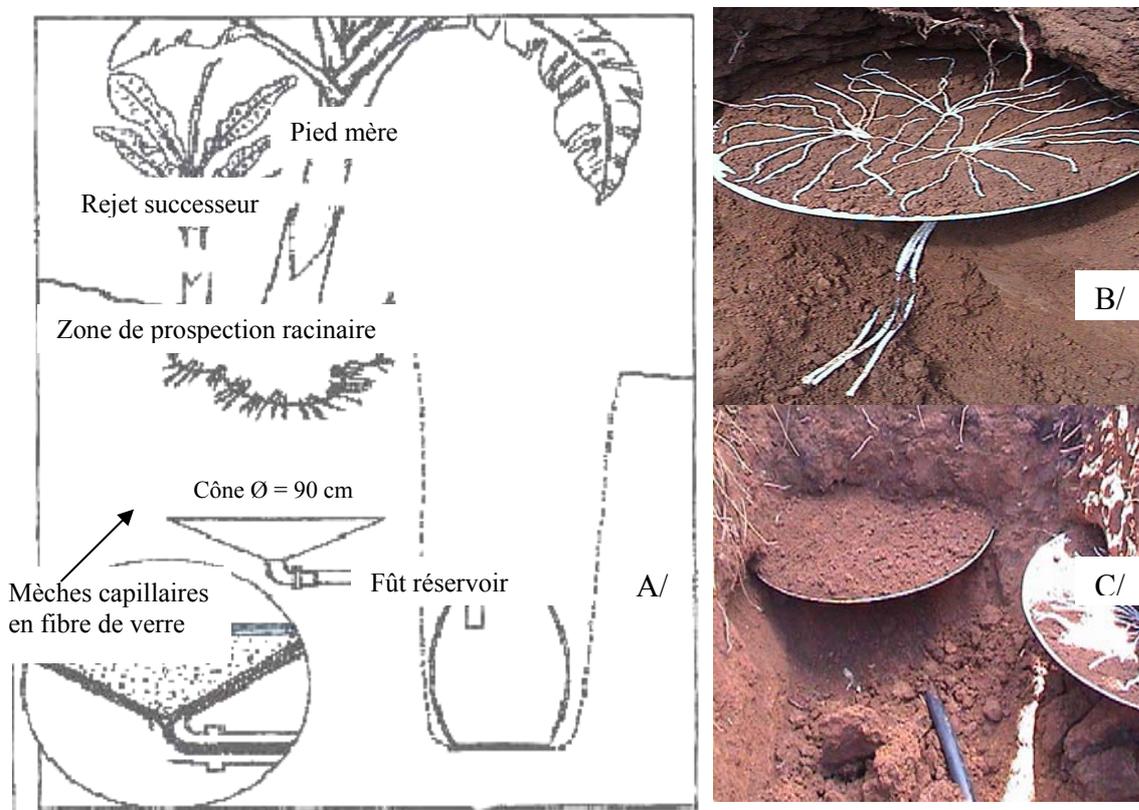


Figure 36. Disposition des lysimètres coniques à mèches capillaires

A/ schéma de la disposition du lysimètre sous bananier,

B/ lysimètre conique avec les mèches capillaires dénouées et réparties à la surface du cône,

C/ disposition des lysimètres sous le bananier et le petit inter-rang (PIR)

Le cône permet une concentration et une évacuation des eaux infiltrées vers le fût réservoir, via un tuyau évacuateur ($\text{Ø} = 50 \text{ mm}$). Il fonctionne comme un évier placé sous une couche de sol, collecte et concentre par écoulement passif les eaux de sub-surface. Le sol étant un milieu poreux, l'eau gravitaire circule rapidement vers le bas dans les macropores ($\text{Ø} > 1 \text{ mm}$) et l'eau capillaire plus lentement dans les micropores ($\text{Ø} < 1 \text{ mm}$). Les mèches capillaires en fibre de verre incluses dans le cône permettent de mobiliser le plus efficacement possible l'eau retenue dans les micropores vers le lysimètre.

Trois lysimètres coniques à mèches capillaires sont mis en place sur les parcelles Ban4 et Ban1 à 60 cm selon le schéma des figures 25 B et 25 C. Il y a un lysimètre sous le bananier (BAR), un dans le grand inter-rang (GIR) et un dans le petit inter-rang (PIR) sur chaque parcelle. Ces positions correspondent aux flux redistribués par le bananier, à savoir le *stemflow* (BAR), et le *throughfall* (PIR et GIR). Les lysimètres sont placés à partir d'une fosse ouverte perpendiculairement à la pente et en aval des bananiers (distance de 30 à 50 cm des plants) sélectionnés pour accueillir les lysimètres. Des cavités latérales sont creusées à -60 cm aux emplacements prévus pour les lysimètres. Les cônes remplis de mèches et de sol sont placés dans leur cavité, puis sont plaqués et immobilisés contre la zone racinaire.

Les eaux de percolation collectées dans les fûts réservoirs (60 litres) sont relevées en fonction des évènements pluvieux et de la vitesse de percolation. Le volume d'eau drainée stockée dans le réservoir est mesuré par la pesée des fûts, avant de prélever des échantillons d'eau destinés aux analyses d'azote minéral.

Le ruissellement

Pour l'évaluation des pertes en eau et en nitrates par ruissellement, 2 cases de ruissellement (Roose, 1999, Khamsouk, 2001) ont été utilisées (Fig.37), une pour chaque traitement (Ban1 et Ban4). Il s'agit de surfaces rectangulaires de 200 m² délimitées par des plaques en tôle semi enterrées (sur 50 cm de profondeur) et se terminant par un canal menant aux cuves de stockage placées en aval.

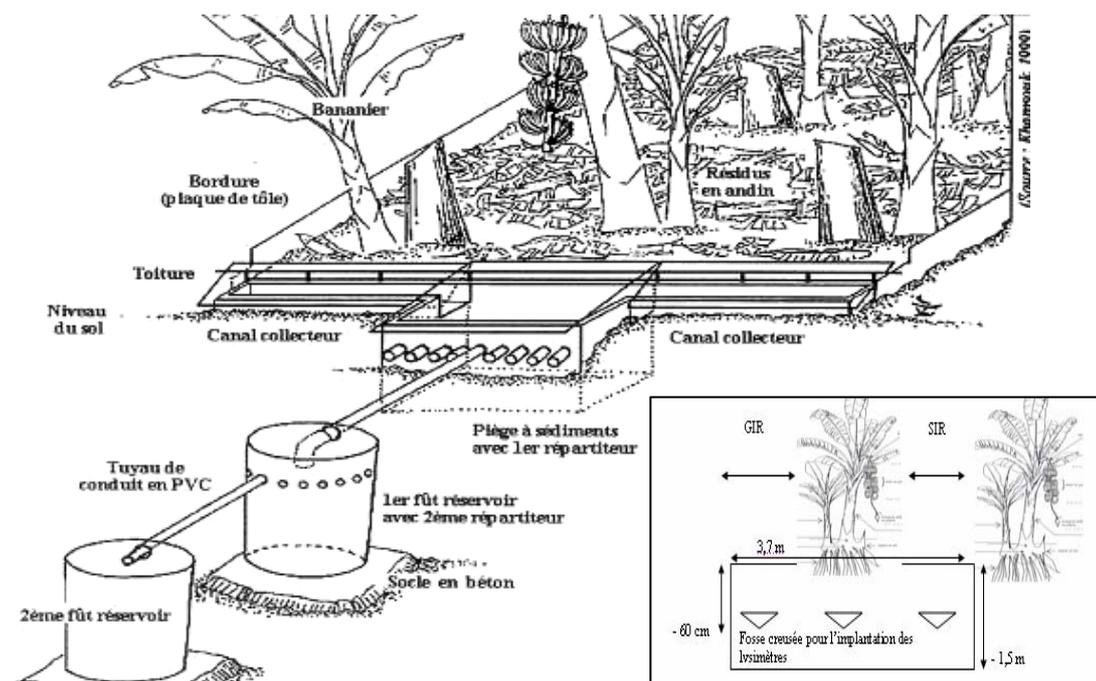


Figure 37. Dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion sous bananeraie (Khamsouk, 2001)
Et Disposition des lysimètres à la parcelle

La cuve de stockage et de sédiments est calibrée afin de permettre l'enregistrement du ruissellement et de la perte de terre suivant l'importance des averses dans le contexte tropical et peut par conséquent recevoir des pluies cycloniques (400 mm en 48 heures).

Construit en béton, le dispositif en aval d'une parcelle d'érosion se compose d'un canal collecteur parcourant toute la largeur de la parcelle, d'une première cuve piégeant les sédiments grossiers ayant à sa base un partiteur à 17 voies ($\varnothing = 50$ mm), d'un fût cylindrique (220 litres) au sommet duquel il y a un partiteur à 23 voies ($\varnothing = 50$ mm), d'un fût cylindrique de stockage de 220 litres. Les cuves sont reliées par des tuyaux en Poly-chlorure de vinyle ou PVC ($\varnothing = 50$ mm), à faible pression.

Le ruissellement est obtenu à partir des mesures du volume d'eau ruisselée au bas des parcelles. Il est calculé avec une précision variant de 0,1 mm en cas de pluies annuelles à 10 mm près en cas de fortes pluies. Le volume ruisselé est mesuré après un événement pluvieux en relevant avec un mètre gradué les côtes d'eau dans le réceptacle (canaux collecteurs, piège à sédiments, fûts répartiteurs). Des échantillons d'eau contenant des matières en suspension sont prélevés à l'aide de bouteille de 1,5 l lors du pompage de la cuve après chaque événement pluvieux pour un dosage d'azote minéral.

II.4.2 Résultats et discussion

II.4.2.1 Bilan des entrées et des sorties d'eau au cours du cycle cultural

Le bilan hydrique (Tab.14) est réalisé sur la campagne de mesures du 28/05/03 au 16/01/04.

La quantité de pluie observée au cours du cycle cultural est de 1422 mm. Le bilan hydrique est expliqué à 35 % par les mesures réalisées et le défaut de bilan permet d'estimer les variations du stock d'eau du sol et l'ETP.

Tableau 14. Entrées et sorties d'eau l'échelle de la parcelle au cours du cycle cultural

Termes (mm)	Ban1	Ban4
Pluie +Irrigation	1462	1462
Ruissellement	22	36
Drainage	497	396
Total sorties	519	432
Variation stock d'eau + ETP	943	1031
Termes (%)	Ban1	Ban4
Pluie +Irrigation	100	100
Ruissellement	1	2
Drainage	34	27

Les pertes totales en eau par drainage sont calculées à l'aide de coefficients de pondération par position permettant d'extrapoler les mesures lysimétriques à l'hectare [6/9 GIR + 2/9 PIR + 1/9 BAR].

Les bilans hydriques des 2 traitements diffèrent d'une part par un drainage plus important en Ban1 par rapport à Ban4 et d'autre part par un ruissellement plus important en Ban4 qu'en Ban1. Dans tous les cas, les pertes en eau par drainage représentent quasiment la totalité des pertes en eau des bananeraies (96 et 92 % du bilan pour Ban1 et Ban4 respectivement) alors que le ruissellement ne représente que 4 à 8 % de ces pertes sans ETP.

II.4.2.2 Drainage et lixiviation en fonction des positions sur la parcelle

La figure 38 montre que selon les traitements, les volumes totaux drainés et le lessivage des nitrates qui s'en suit varient selon les différentes positions dans la bananeraie. Pour Ban1, le drainage est relativement plus important en position GIR (598 l.m⁻²) qu'aux autres positions BAR et SIR (respectivement 556 et 530 l.m⁻²). Inversement, pour Ban4, le drainage est trois fois plus important au pied du bananier (948 l.m⁻²) que dans les inter-rangs.

Ces différences entre traitements sont accentuées pour la lixiviation. Pour Ban1, la lixiviation est plus importante en position GIR (14 g.m⁻²) qu'aux autres positions BAR et SIR (respectivement 10 et 11 g.m⁻²). Pour Ban4, la lixiviation est six fois plus importante au pied du bananier (12 g.m⁻²) que dans les inter-rangs.

Les pertes totales en NO₃⁻ par lixiviation sont calculées à l'aide des mêmes coefficients de pondération que ceux utilisés pour le calcul des pertes en eau à l'hectare et sont de 24 kg.ha⁻¹ pour la parcelle Ban4, et de 112 kg.ha⁻¹ pour les parcelles Ban1.

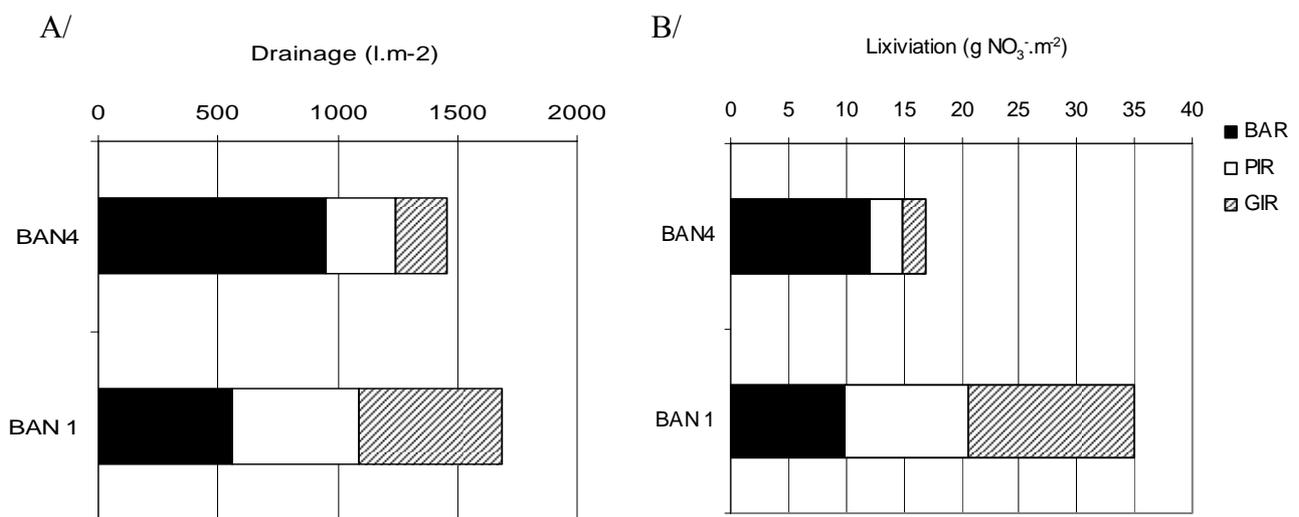


Figure 38. Drainage (A) et pertes totales en nitrates (B) au cours d'un cycle de culture
Positions BAR : au pied du bananier, PIR : petit inter-rang, GIR : grand inter-rang

Ces observations globales de l'hétérogénéité des flux d'eau et d'azote s'observent également de façon dynamique au cours du cycle. Les figures 39A et 39B illustrent ces phénomènes de la plantation (28/05/03) au début de la floraison (28/10/05). Par exemple, le 04/08/03, pour

Ban1, les pertes en drainage en position BAR ont été de 6 l.m⁻² et en lessivage de NO₃⁻, de 680 mg.m⁻², en position GIR le drainage était trois fois plus grand et le lessivage deux fois plus grand. Pour Ban4, le même jour, les pertes en drainage en position BAR ont été de 19 l.m⁻², soit trois fois plus qu'en Ban1 et en lessivage de 410 mg.m⁻² de NO₃⁻, soit presque deux fois plus faible. Ce drainage et ce lessivage en position BAR représentaient cinq à six fois ceux de la position GIR.

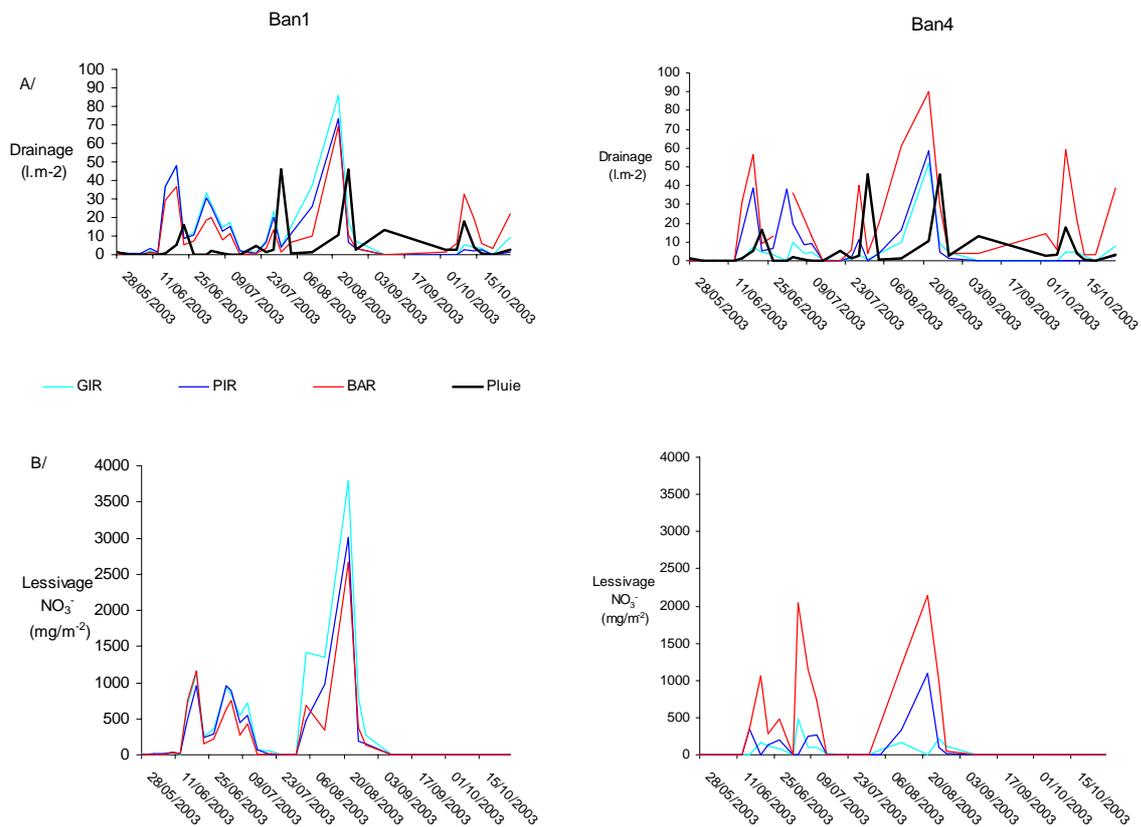


Figure 39. Dynamique du drainage (A) et du lessivage (A) sur la période du 28-05-03 au 28-10-03
Positions BAR : au pied du bananier, PIR : petit inter-rang, GIR : grand inter-rang

II.4.2.3 Relations volume drainé/nitrates lixiviés

Les volumes d'eau drainés et les quantités de nitrates lixiviés (Tab.15) sont significativement corrélés avant la floraison en bananeraie de premier cycle. Les régressions réalisées pour le 4^{ème} cycle de culture n'expliquent qu'une faible partie du nuage de points obtenus. La relation entre les flux d'eau et les nitrates lessivés est la moins évidente pour le GIR de la parcelle Ban4. La présence de résidus qui limitent les flux d'eau à cette position peut expliquer cette observation.

Tableau 15. Corrélation entre nitrates lixiviés et volume d'eau drainé avant la floraison

Positions	a	b	r ²
BAR 1	0.0283	0.019	0.757
PIR 1	0.0322	0.123	0.699
GIR 1	0.0294	0.039	0.619
BAR 4	0.0113	0.031	0.296
PIR 4	0.0098	0.001	0.444
GIR 4	0.002	0.033	0.042

On observe par ailleurs, une corrélation significative entre le drainage total et les quantités de nitrates lixiviés (Fig.40) en considérant toutes les positions et les deux traitements.

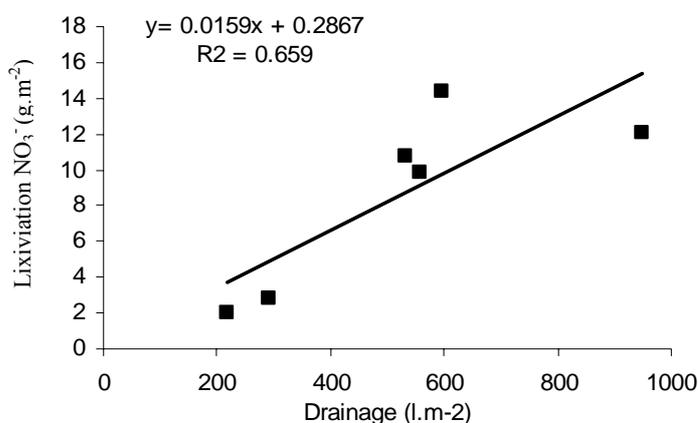


Figure 40. Corrélation entre quantités totales de nitrates lixiviés et volume total d'eau drainé

II.4.2.4 Concentrations de nitrates dans les eaux de drainage

Le tableau 16 présente les concentrations en nitrates dans les eaux de drainage. Pour tous les traitements, en saison sèche SS1 avant la plantation, les concentrations en nitrates des eaux de drainage sont supérieures à 71 mg/l. En Ban4, alors que l'on n'observe pas de différences très importantes des concentrations entre les positions, en Ban1, les concentrations en moyenne sont une fois et demie plus élevées au pied du bananier. La période SS2 se situe en fin de saison sèche, au moment de la plantation en Ban1 et du recépage en Ban4. Cette période génère des concentrations plus importantes en Ban4, de l'ordre de 25 mg/l ; en Ban1, les concentrations sont deux à cinq fois supérieures et ainsi seulement légèrement plus faibles que celles de SS1. En saison humide SH, les concentrations en nitrates diminuent de manière plus importantes pour les deux positions. Cette diminution est d'un facteur deux pour Ban4 et deux à cinq pour Ban1.

**Tableau 16. Concentrations des nitrates dans les eaux de drainage:
comparaison des cycles cultureux**

SS1 = saison sèche avant plantation Ban1 du 31-03-03 au 26-05-03 57 jours

SS2 = saison sèche après plantation Ban1 du 28-05-03 au 27-06-03 31 jours

SH = saison humide du 02-07-03 au 13-11-03 156 jours

BAR = bananier

PIR = petit inter rang

GIR = grand inter rang

Concentration NO ₃ ⁻ (mg.l ⁻¹)	Ban1			Ban4		
	BAR	PIR	GIR	BAR	PIR	GIR
SS1 Minimum	117.5	57.5	40.0	13.0	100.0	4.0
SS1 Maximum	170.0	93.0	115.0	208.0	206.0	151.0
SS1 Moyenne	139.9	74.7	92.0	100.8	130.0	96.5
SS1 Nombre d'évènements	11.0	11.0	11.0	5.0	6.0	4.0
SS2 Minimum	28.3	25.8	28.9	17.0	25.5	8.0
SS2 Maximum	211.0	93.0	130.0	36.2	28.6	25.2
SS2 Moyenne	112.6	65.1	80.3	28.0	27.0	19.3
SS2 Nombre d'évènements	6.0	6.0	6.0	3.0	2.0	3.0
SH Minimum	6.3	4.6	9.3	0.2	4.0	7.5
SH Maximum	38.2	58.5	106.9	56.1	29.1	50.5
SH Moyenne	22.9	31.2	35.8	17.3	11.2	19.8
SH Nombre d'évènements	20.0	16.0	16.0	12.0	10.0	12.0

Pour tous les traitements, en saison sèche SS1 avant la plantation, les concentrations en nitrates des eaux de drainage sont très supérieures aux normes (50mg/l). Durant la période SS2, où les rejets fonctionnels de Ban4 peuvent absorber l'azote biodisponible, les concentrations sont moins importantes (la moitié de la norme) alors qu'en Ban1, les flux sont toujours très supérieurs à la norme puisque les vitroplants ne peuvent accéder aux nitrates présents à plus de 15 cm de profondeur. En saison humide SH, les concentrations en nitrates sont diluées du fait des excès d'eau, même s'il persiste quelques évènements très concentrés après les applications d'engrais.

II.4.3 Discussion

Plusieurs déterminants des flux d'eau distinguent les traitements étudiés : (i) les capacités des cultures à absorber l'azote biodisponible, (ii) l'évolution du LAI et sa distribution dans l'espace, et (iii) la présence de mulch de résidus à la surface du GIR.

En début de végétation, les rejets de Ban4 sont capables d'absorber l'azote biodisponible à une profondeur plus importante (60 cm) que les vitroplants en Ban1 qui doivent s'adapter aux conditions du champ et qui ont un système racinaire réduit (15 cm de profondeur). Les pertes par lessivage sont donc limitées de ce fait en bananeraie établie en début de cycle.

Dans les bananeraies nouvellement plantées, dans le GIR, l'absence de couverture du sol en début de cycle, est remplacée par l'égouttage des feuilles peu avant la floraison, puis le GIR

est recouvert par les feuilles qui se superposent et couvrent le rang. Les volumes drainés deviennent alors très inférieurs (à partir de la floraison) à ceux drainés au pied du bananier. Les volumes d'eau drainés seraient ainsi directement fonction du LAI et de sa distribution dans l'espace.

Dans la bananeraie établie, la désynchronisation du peuplement permet un recouvrement des inter-rangs plus ou moins important de façon continue au cours du cycle, ce qui limite les entrées d'eau à ce niveau. Dans ce cas, le facteur principal générant les flux d'eau et donc le lessivage, est la concentration de la pluie le long du pseudotrunc (Bussière *et al*, soumis). On montre en effet, en parcelle établie, un volume d'eau drainé au pied du bananier deux à quatre fois supérieurs à ceux mesurés dans le petit inter-rang et le grand inter-rang. La présence de résidus au sol dans le GIR est également un facteur déterminant des pertes totales en eau et en nitrates qui distinguent les traitements étudiés. En effet, dans les parcelles nouvellement plantées, les pertes en nitrates au cours d'un cycle cultural sont 4,5 fois supérieures aux situations avec des restitutions de résidus en Ban4. Le paillis, en procurant une couverture physique protectrice au sol, protège les états de surface de la formation de croûtes de battance causées par l'impact direct des gouttes de pluie sur le sol, il limite alors le ruissellement et le transport solide des particules fines de sol (Valentin et Bresson, 1992 ; Findeling, 2001). Ainsi, lorsque le sol est découvert au moment de la replantation, la forte infiltrabilité (Mando, 1997 ; Trojan, 1998) et l'absence de résidus génère des flux d'eau et de solutés huit fois plus importants au niveau du grand inter-rang que dans une parcelle établie.

II.4.4 Conclusion

Les résultats de ces essais montrent comment l'hétérogénéité de type architectural de la culture bananière qui évolue au cours du cycle affecte fortement les pertes en eau et en nitrates à la parcelle. Par ailleurs, les concentrations des eaux de drainage mesurées sont beaucoup plus grandes que la norme définissant la potabilité de l'eau. Même si les eaux de drainage sorties des parcelles ne sont pas consommées, elles génèrent des risques de pollution des rivières et du milieu marin proches des zones de cultures. Les risques de pollution sont surtout évidents la première année, où le sol reste peu couvert jusqu'à la différenciation florale (4 mois et demi après la plantation), alors que lors des cycles suivants, la désynchronisation du peuplement et les résidus de cultures maintiennent un couvert permanent du sol qui limite les entrées d'eau et les pertes par drainage. Il n'y a pas non plus, dans ces derniers cas, de flux importants après la récolte comme dans le cas de cultures annuelles où le sol est laissé nu entre deux cultures.

III DISCUSSION GENERALE: BILAN DE L'AZOTE EN BANANERAIE

L'objectif de ce chapitre de la thèse est de présenter un bilan global de l'azote dans le système étudié en tenant compte des différents termes évalués au cours des expérimentations.

Ces termes, pour des raisons opérationnelles et des objectifs de chaque expérimentation, ont été mesurés en s'affranchissant de la présence des autres termes, et avec des apports d'engrais spatialement homogène à la parcelle. Par exemple, dans le cas de l'expérimentation destinée à quantifier le lessivage, il était nécessaire de réaliser un apport homogène pour comparer l'effet de l'architecture de la plantation sur les pertes d'azote.

Le bilan estimé dans cette section peut être significativement différent de celui correspondant au système de culture classique basé sur la méthode du SCP. En effet, les modalités de l'application de l'engrais dans ce système (p.ex. localisation au pied du pseudotrunc, application fractionnée en fonction de la pluviométrie) peuvent affecter certains termes du bilan. Ainsi, les différents termes du bilan ayant tous été mesurés pour un apport d'engrais homogène à la parcelle, sauf celui correspondant à l'organisation de l'engrais, il est nécessaire de discuter le bilan établi et la validité de son extrapolation au système classique.

III.1 BILAN DE L'AZOTE

Le bilan de l'azote sous bananeraie en fonction des cycles culturaux est présenté dans le tableau 17.

Dans ce paragraphe, tout d'abord les résultats du bilan sont discutés individuellement à l'échelle du cycle puis sur les 5 ans de la plantation, enfin, des propositions d'amélioration de la gestion de la fertilisation sont proposées aux vues des éléments sus-citées.

Tout d'abord, le drainage important mesuré dans mes expérimentations démontre la grande perméabilité du sol brun à halloysite, ce qui confirme que ma proposition concernant l'absence de dénitrification est une simplification raisonnable. La volatilisation et la dénitrification étant considérés comme négligeables, après avoir sommé les termes de sorties d'azote du bilan et fait la différence avec les apports par le reliquat à la plantation, l'engrais et la minéralisation des résidus le cas échéant, le défaut de bilan a été assimilé à la minéralisation nette de la matière organique du sol.

La valeur de la minéralisation nette des résidus du bilan correspond à 65 % des 90 kg d'azote contenu dans les résidus à la récolte, tel que nous l'avons estimé dans la section II.2.2.4. L'organisation de l'engrais a été calculée en proportion de la quantité apportée en nous basant sur les résultats montrés au préalable. Compte tenu que cette estimation est réalisée à partir

d'une mesure correspondant à un apport localisé d'engrais (section II.3), elle peut être assimilée à la valeur minimale pour un apport d'engrais homogène. En effet, avec une application homogène, l'organisation de l'engrais serait affectée par les résidus placés dans l'inter-rang ainsi que par la décomposition de la souche (Fig.41). Seule la dernière source de carbone intervient dans le cas d'un apport localisé de l'engrais.

Les autres termes du bilan sont les résultats des mesures directes.

Tableau 17. Bilan N pour Ban1 et Ban4 (cycle cultural mai 2003-janvier 2004)
Les valeurs sont exprimées en kg.ha⁻¹

Ban1			
Entrées		Sorties	
Reliquat à la plantation	40	Ruissellement	8
Engrais	370	Lixiviation	112
Minéralisation MOS	286	Absorption plante	145
		Organisation engrais	74
		Reliquat fin de culture	357
Somme	696		696
Ban4			
Entrées		Sorties	
Reliquat à la plantation	59	Ruissellement	1
Engrais	370	Lixiviation	24
Minéralisation MOS	180	Absorption plante	53
Minéralisation nette des résidus	58	Organisation engrais	148
		Reliquat fin de culture	442
Somme	667	667	667

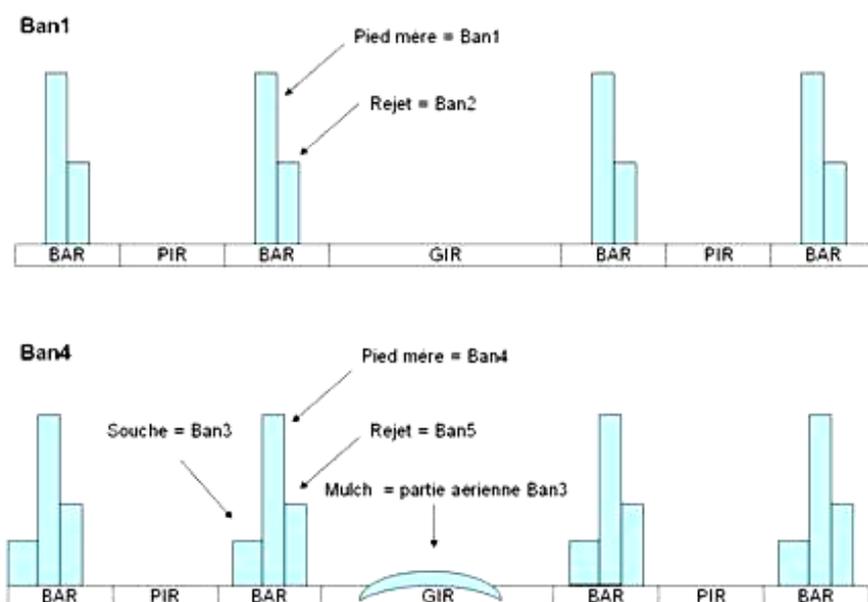


Figure 41. Schéma de fonctionnement des systèmes de culture bananiers.

Les ordres de grandeur des flux d'azote générés dans les systèmes sol-plante étudiés sont relativement importants, et la variation de la quantité d'azote

minéral entre le début et la fin du bilan est comparable dans les deux cycles étudiés.

L'entrée correspondant à la minéralisation nette de la matière organique du sol est relativement importante, notamment en Ban1. Si l'on considère que toute la minéralisation se produit dans les premiers 30 centimètres du sol, elle correspondrait à 10% de l'azote total en Ban1 et à 6% en Ban4. Le taux de minéralisation plus important en Ban1 pourrait s'expliquer par les températures plus élevées du sol non couvert pendant une longue période en début du cycle cultural.

L'importance relative des termes des sorties varie en fonction du cycle. Pour le premier cycle, l'absorption de la culture et les pertes par lessivage sont les sorties les plus importantes, alors que pour les cycles suivants l'absorption, comme le lessivage sont plus faibles, et l'organisation de l'engrais est alors la « sortie » la plus importante.

Il est important de remarquer que les reliquats d'azote minéral en fin de culture sont également très élevés, et équivalents à la dose d'engrais apportée.

III.2 DISCUSSION DU BILAN

La discussion du bilan porte sur chacun des éléments constituant ce dernier.

L'absorption de l'azote par la culture telle qu'elle a été mesurée dans cette étude correspond uniquement à la part du pied mère en négligeant la part du rejet. Les quantités totales absorbées seraient donc légèrement plus élevées que celles utilisées dans le bilan. Le rejet à la récolte avait environ 3 mois, sur la base de mes résultats, cette absorption supplémentaire correspondrait à 10% du total mesuré.

Les vitesses de minéralisation nette des MOS sont plus importantes que celles observées pour d'autres systèmes de culture (Remy et Marin-Laflèche, 1976; Sierra *et al.*, 2003). On suppose que ce résultat serait associé principalement à la taille de la fraction labile des MOS et à son recyclage rapide dû aux conditions du milieu (p.ex. température, teneur en humidité du sol). Cette fraction serait alimentée en continu par les importantes entrées exogènes de carbone et d'azote dans le système bananier (par exemple résidus de culture, engrais). Ainsi, l'azote de l'engrais contribuerait à fixer de façon temporaire une partie importante du carbone rentré au sol via les résidus de récolte. Bien qu'une partie de ces entrées puissent être humifiée et faire partie des MOS plus stables (Clermont-Dauphin *et al.*, 2004), les conditions de température du sol sont favorables aux processus de type catabolique (Sierra et Marbán, 2000). Si cette hypothèse est vraie, les différences de minéralisation nette entre Ban1 et Ban4 (Tableau 14) seraient induites par la taille de la fraction labile dans chaque situation (c.a.d. plus grande en Ban4), laquelle serait fonction de la quantité de cycles sous banane, et donc des entrées totales en carbone et en azote exogène.

Nous avons pu constater en effet lors de l'expérimentation réalisée en 2eme cycle cultural sans aucun apport d'engrais que la culture obtenait un rendement similaire au premier et au quatrième cycle cultural où nous avons apporté 370 kg de N.ha⁻¹.

Le recyclage relativement rapide des fractions labiles des MOS discuté ci-dessus, amène à reconsidérer le terme "organisation de l'engrais" tel qu'il a été inclus dans le bilan présenté dans le Tableau 15. En effet, il est considéré comme une sortie d'azote disponible, ce qui implique que l'organisation de l'azote apporté a été considérée comme étant définitive, au moins en relation aux cycles analysés. Similairement à ce discuté plus haut, il est probable qu'une partie de l'azote apporté et organisé soit reminéralisée lors du cycle. A cause de ce phénomène, la minéralisation nette des MOS aurait été surestimée, ce qui pourrait être contrebalancé par la sous-estimation associée au fait que la valeur de l'organisation de l'engrais est minimale.

Nous sommes face à un système de culture semi-pérenne où les flux d'azote sont très importants. Ce qui explique les raisons majeures pour porter attention à la gestion de l'azote dans ce système ce sont les conditions pédoclimatique de la ZTH (c'est-à-dire, température et humidité élevées) qui entraîne des vitesses de transformations biologiques très rapide et des variations rapides de la quantité d'azote biodisponible dans le sol à cause du lessivage important.

L'hypothèse que je fais pour expliquer ce fonctionnement, conforté par des travaux récents, est que le système est tributaire des entrées importantes de carbone (via les résidus) et d'azote (via les engrais), ce qui se traduit par un recyclage rapide des compartiments les plus labiles des MOS. Cette hypothèse pose donc la question du devenir des équilibres biologiques du sol dans la perspective d'une réduction significative des doses d'engrais appliquées.

Si on diminue les doses d'engrais, on suppose fortement que ni la culture ni les phénomènes de minéralisation de MOS et de décomposition des résidus ne seront limités (c'est d'ailleurs ce que nous avons observé lors de l'essai au champ avec résidus et sans engrais). En effet, les entrées d'azote continueraient à être élevées et donc la culture ne serait pas limitée par ce nutriment. En revanche, la séquestration de carbone serait de moins en moins importante à cause de la diminution de la quantité d'azote contribuant à sa fixation dans les MOS. A moyen terme, la diminution de la taille des fractions labiles des MOS devrait aussi limiter le taux de minéralisation.

En l'état actuel, ce système ne pose donc pas de problème de nutrition de la culture mais bel et bien des problèmes de risques de pollution.

Pour savoir comment va fonctionner le système à long terme, c'est-à-dire s'il y aura des reliquats ou plutôt de la séquestration grâce à l'économie de carbone labile non minéralisé, le recours à la modélisation est indispensable. Les données acquises au cours de ces travaux de thèse peuvent permettre de paramétrer un modèle de culture comme STICS ou WANULCAS pour répondre à ces questions.

III.3 CONCLUSION : EXTRAPOLATION A UNE GESTION BASEE SUR LE SCP

Comment le bilan élaboré pour des apports homogènes peut-il être extrapolé dans un système géré par le SCP, avec des apports d'engrais localisés ?

Pour le savoir, nous allons discuter les termes du bilan qui pourraient varier avec la localisation de l'engrais.

Absorption de la plante : il peut être admis qu'elle ne changera pas notablement en fonction de la modalité des apports azotés. Cela est dû, d'une part, au fait que la répartition des racines du bananier permette l'absorption d'azote aussi bien dans le rang que dans l'inter-rang (Lecompte *et al.*, 2001) et, d'autre part, au fait que les besoins de la plante en azote sont largement dépassés pour les entrées dans le système. Par rapport à ce dernier point, l'absorption de la plante seulement serait affectée si l'un des termes de sortie augmente face à une application localisée de l'engrais (par exemple une augmentation du lessivage qui réduirait fortement la quantité d'azote disponible).

Décomposition des résidus : elle ne devrait pas changer avec une application localisée de l'engrais compte tenu que l'azote du sol ne serait pas une limitation car la minéralisation des MOS suffirait à satisfaire les besoins des microorganismes. Les essais menés nous ont permis d'observer une décomposition complète des résidus au champ sans apport d'engrais (section II.2.2.2); ce résultat soutient donc la proposition précitée. En ce qui concerne la **minéralisation des MOS**, elle ne devrait pas être affectée par l'engrais (Sierra *et al.*, 2001). En revanche, les contributions respectives de l'azote des résidus, de l'azote de l'engrais et de la minéralisation à la nutrition du peuplement végétal seront probablement différentes dans un système géré par le SCP. En effet, les proportions mesurées l'ont été dans des conditions d'exclusion d'une ou l'autre des deux sources.

Lessivage : analyser l'éventuelle variation spatiale et quantitative de l'azote lessivé n'est pas aisé, car cette perte ne dépend pas uniquement de la quantité d'engrais apportée et de son mode d'application. En effet, les processus biologiques utilisant l'azote apporté (absorption végétale, organisation), même dans le cas où ils ne changent pas en quantité globale, auront

une répartition spatiale différente, détermineront la quantité et la répartition de l'azote susceptible d'être lessivé. En principe, dans le cas de la bananeraie en premier cycle, les pertes totales seraient inférieures puisque aucun engrais ne serait apporté dans le grand rang, zone préférentielle de déperdition de l'engrais. Dans le cas d'une bananeraie établie, les pertes par lessivage pourraient être légèrement supérieures car le *stemflow* était à l'origine de la plupart des pertes. Pourtant, ce scénario peut être différent en fonction de l'efficacité de l'engrais apporté au pied du bananier.

Les difficultés pour analyser les changements spatiaux des termes du bilan pourraient être en grande partie levées par la modélisation des flux majeurs du cycle de l'azote intégrant les variabilités spatio-temporelles des flux et leurs déterminants agropédologiques.

III.4 BILAN SUR 5 ANS

Rappelons pour comprendre les perspectives en terme de gestion que le bilan est une base pour définir les quantités totales d'engrais à apporter, pour une culture donnée dans une situation pédoclimatique donnée. Le bilan déterminé dans ce cas peut permettre une extrapolation temporelle en fonction des variations climatiques annuelles. Pour cela, il faut avoir recours à des modèles dynamiques de fonctionnement de culture cités plus haut (STICS, WANULCAS). Cependant, en raison du coût opérationnel élevé de paramétrisation de ces modèles, leur usage est souvent restreint à l'évaluation du fonctionnement de certains compartiments du cycle de l'azote au sein d'un système de culture donné. Suite à ces travaux, les modèles peuvent permettre d'évaluer les interactions dynamiques des différents termes du bilan en bananeraie et permettre de caractériser la mise en place d'un nouvel équilibre du système dans la perspective de la diminution des apports d'engrais.

A l'usage des centres techniques et des agriculteurs, de nombreux outils de diagnostic et de gestion de la fertilisation azotée fondés sur la méthode du bilan et intégrant les risques de pertes d'azote sous forme de nitrates ont été mis au point en France. On peut citer AZOBIL et plus récemment AZODYN mis au point par l'INRA.

Le tableau 18 représente le bilan de l'azote sur les 5 années du cycle de culture réalisé à partir des valeurs du tableau 17. Les besoins en engrais sont calculés en faisant la différence des sorties et des entrées. Ainsi, on s'aperçoit que les besoins en engrais de ce système seraient quasiment nulles et ce même en considérant l'organisation de l'azote minéral comme un

terme de sortie. Il y a donc des possibilités accrues de diminution des doses d'engrais apportés par les pratiques actuelles.

Tableau 18. Bilan N pour un cycle cultural de 5 ans
Les valeurs sont exprimées en kg/ha

	R1	R2	R3	R4	R5	Somme
Entrées						
Reliquat à la plantation	40	40	40	40	40	200
Minéralisation MOS	286	180	180	180	180	1006
Minéralisation résidus	0	58	58	58	58	232
Somme Entrées	326	278	278	278	278	1438
Sorties						
Absorption plante	145	53	53	53	53	357
N lixiviation	112	24	24	24	24	206
N organisé	74	148	148	148	148	666
Somme Sorties	331	225	225	225	225	1231
N fertilisation	5	-53	-53	-53	-53	-207

III.5 PRODUIRE LA BANANE AUTREMENT...

Utilisation d'indicateurs

En général, cette approche de gestion par le bilan peut être couplée à une gestion dynamique à partir d'indicateurs plante pour apporter la juste dose au bon moment. Pour y parvenir, plusieurs limites se posent de part le fonctionnement propre de la culture bananière, c'est-à-dire du fait de la désynchronisation du peuplement qui rend difficile une approche classique d'utilisation des indicateurs plante se référant à une courbe de dilution ou au bilan azoté d'une culture homogène en terme de croissance. En effet, dès le 3^{ème} cycle de la culture, piloter les apports de fertilisants par des indicateurs plante signifierait calculer les doses d'apport à l'échelle de la plante, ce qui engendrerait un surcoût par rapport aux techniques actuelles d'épandage manuel ou par fertigation.

L'utilisation des indicateurs, comme cela est fait classiquement, devrait donc être redéfinie. On pourrait alors envisager, suite à une évaluation de la satisfaction nutritionnelle d'un échantillon représentatif de la population, de réaliser un apport moyen d'engrais correspondant au stade de croissance majoritaire.

Localisation des apports d'engrais chimiques et gestion des résidus de culture

L'hétérogénéité des systèmes de cultures bananières créée par l'architecture de la plante redistributrice des flux d'eaux, et par l'inégale répartition des résidus à la surface du sol, pose le problème de la localisation des apports d'engrais pour limiter les pertes par les différents processus du cycle de l'azote (lessivage notamment).

En premier cycle cultural, il peut être envisagé de réaliser une association culturale avec une herbacée ayant des propriétés nématicides par exemple afin de couvrir le grand inter rang, généralement non couvert pendant une longue période allant environ jusqu'à la différenciation florale. Les apports d'engrais localisés seraient alors plus judicieux puisque les systèmes racinaires en phase d'élaboration ne peuvent absorber l'engrais qui serait répandu à une plus grande distance des faux troncs.

En second cycle cultural, le problème de la localisation des apports d'engrais se pose en d'autres termes. En effet, le bananier dès le deuxième cycle cultural a un système racinaire bien établi qui lui permet d'absorber l'azote minéral dans les inter-rangs. Les apports homogènes à la parcelle pourraient ainsi être très bien valorisés. Ils peuvent être facilement envisagés puisque l'interdiction d'épandage de pesticides ne justifie plus de laisser les résidus dans le grand inter-rang pour faciliter le passage des ouvriers lors des apports de ces matières actives et ces apports homogènes de résidus permettront de limiter la repousse des adventices. Les apports d'engrais réduits pourront ainsi être apportés sur les résidus de culture afin de faciliter leur décomposition et la restitution des nutriments à la culture.

La gestion du paillage des résidus de culture est donc recommandée avec un découpage plus important que celui qui est fait actuellement, sans le faire non plus de façon trop fine, car un découpage trop fin est non seulement coûteux en main d'œuvre mais cela pourrait également accélérer de façon exagérée la décomposition des résidus.

IV CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de la thèse était d'évaluer les différents termes du bilan de l'azote biodisponible sous bananeraie dans le cadre d'une gestion par la méthode du SCP, afin de pouvoir livrer les déterminants d'une nouvelle approche pour gérer la fertilisation azotée. En effet, l'information disponible laissait penser que cette méthode n'assurait pas la durabilité des systèmes de culture bananiers aux Antilles. Dans le passé, la démarche que nous avons mise en place n'avait été réalisée que partiellement, seulement quelques variables affectant la disponibilité d'azote avaient été analysées. De ce fait, la méthode de gestion par le SCP n'avait pas été rigoureusement évaluée et les conséquences sur les différents termes du bilan n'avaient pas été établies.

Un choix préalable avait été défini quant à l'approche théorique et expérimentale à mettre en œuvre. Il s'agissait de quantifier les termes majeurs du bilan au champ tout en assurant un maximum de précision. Dans ce cadre, j'ai utilisé la technique de traçage isotopique à l'azote 15 pour mesurer le devenir de l'engrais et des résidus de culture, et des cases de ruissellement et des lysimètres placés sur les mêmes parcelles pour mesurer en parallèle le lessivage, le ruissellement et l'absorption végétale. Des mesures complémentaires ont été réalisées en conditions contrôlées de laboratoire afin de mieux cerner et de modéliser l'évolution temporelle des résidus de culture. L'ensemble des protocoles mis en place nous ont permis d'une part d'obtenir des mesures fiables sur de processus physiques et biologiques mal connus en bananeraie, et d'autre part d'appréhender le bilan global de l'azote biodisponible.

Nous avons montré que dans les systèmes de cultures bananiers classiques, l'ordre de grandeur des flux d'entrées et de sorties d'azote est largement supérieur à ceux couramment observés en milieu tempéré et en milieu tropical pour d'autres systèmes cultivés. D'ailleurs, les entrées dépassent amplement les besoins d'azote de la plante. Il est donc évident que la gestion basée sur la méthode SCP a tendance à surestimer les besoins en engrais azoté car elle ne tient pas compte des autres entrées qui se sont avérées importantes dans cette étude.

Parmi ces entrées, nous avons démontré que l'apport de l'azote issu de la décomposition des résidus est loin d'être négligeable, et que cet apport est de plus, synchronisé avec la période d'absorption maximale de la plante. En effet, la décomposition des résidus ne rentre pas en concurrence avec l'absorption de la plante puisque la phase d'immobilisation de l'azote minéral est courte pour les organes qui fournissent de l'azote à la culture (feuille et pseudotrunc). De plus avec les nouvelles techniques culturales (p.ex. œilletonnage précoce), les rejets sont à un stade de plus en plus proche de la différenciation florale lors de la récolte du pied mère et donc de l'apport des résidus.

Les résidus de cultures sont donc un élément fondamental et multifonctionnel dans ce système de culture pérenne. Ils jouent non seulement un rôle alimentaire pour la culture mais aussi un rôle de restitution de MO au sol, de protection du sol vis-à-vis des transferts d'eau, et un rôle dans le devenir de l'engrais. D'autres études montrent de plus, le rôle qu'ils peuvent jouer dans la gestion des adventices. Cela implique que les résidus doivent être prise en compte dans la gestion de la fertilisation du système et ce, dès la première récolte.

Par ailleurs, il apparaît que la prise en compte des caractéristiques biochimiques des résidus soit essentielle afin d'améliorer les simulations de leur décomposition. Nos résultats suggèrent que les paramètres qui caractérisent les fonctions de la biomasse microbienne ne sont pas identiques pour le carbone et pour l'azote. Des travaux utilisant des marqueurs isotopiques permettraient d'explorer cette hypothèse.

Il est nécessaire de préciser que cette étude reste incomplète au sujet de l'évaluation précise de la minéralisation des MOS et de la durée de l'organisation de l'engrais. Il s'agit des "maillons faibles" du bilan. Des mesures *in situ* sont nécessaires mais les expérimentations peuvent présenter de sérieuses limitations. Dans le cas de l'estimation de la minéralisation, la présence de racines de façon relativement homogène et superficielle à la parcelle rend difficile l'utilisation de la méthode d'incubation *in situ* de sol. Dans le cas de l'évaluation de l'organisation de l'engrais, il serait nécessaire de faire des applications d'engrais marqué à l'azote 15 à chaque stade clé sur des placettes différentes, ce qui pour une bananeraie représenterait des coûts très élevés du fait du nombre de répétitions requis pour une plantation hétérogène. Une réflexion sur la méthodologie à utiliser doit ainsi être menée si l'on veut pouvoir accéder précisément à la valeur de ces termes du bilan de l'azote.

Les résultats de ce travail montrent que le système de culture bananier classique est tributaire des entrées importantes de carbone et d'azote, ce qui se traduit par un recyclage rapide des compartiments les plus labiles des MOS. Ainsi, nous avons montré que la décomposition des résidus pouvait générer une forte organisation du carbone et dans une moindre mesure de l'azote, ce qui pourrait à long terme être à l'origine d'une augmentation du rapport C/N du sol. Cette observation pose donc la question du devenir des équilibres biologiques du sol dans la perspective d'une réduction significative des doses d'engrais appliquées.

Une hypothèse à tester dans de futures études est que cette réduction affecterait plus l'équilibre organisation-minéralisation que l'absorption et la production végétale. En effet, les entrées d'azote continueraient à être élevées et donc la culture ne serait pas limitée par ce nutriment. En revanche, la séquestration de carbone serait de moins en moins importante à cause de la diminution de la quantité d'azote contribuant à sa fixation dans les MOS. A moyen

terme, la diminution de la taille des fractions labiles des MOS devrait aussi limiter le taux de minéralisation. Ce scénario dévoile un éventuel antagonisme entre l'objectif environnemental associé à la réduction des intrants pour la diminution des pertes d'azote par lessivage, et celui lié au maintien d'une organisation du carbone importante.

La difficulté que nous avons retrouvée pour extrapoler le bilan établi pour des apports homogènes à une situation avec des apports localisés, montre clairement la complexité du système bananier, lequel présente des hétérogénéités de type architectural qui évoluent dans le temps et affectent fortement les déterminants du bilan azoté dans l'espace et dans le temps. Il est évident que la seule expérimentation ne suffirait pas à cerner toutes les interactions de ce système. D'ailleurs, le test de l'hypothèse énoncée ci-dessus concernant l'évolution des équilibres dans le sol ne peut être abordée sans le recours à la modélisation. Pour tenir compte des besoins de compréhension et des contraintes d'un système hétérogène l'utilisation d'un modèle en 2D s'impose. Le modèle Wanulcas, ayant été testé par l'équipe APC pour simuler, dans le cas d'une bananeraie, les transferts d'eau hétérogènes à la parcelle, pourrait être employé à cet effet. Dans un deuxième temps, il faudrait passer à un modèle opérationnel permettant de tester des modes de pratiques, et de servir de base pour des conseils de fertilisation.

Abiven, S., 2001. Effet de la qualité et de la localisation initiale dans le sol sur la Décomposition de résidus de culture". DEA Paris, INA P-G, PARIS vi: 41.

AGRESTE, La statistique agricole. Memento agricole. Résultats 2003 Guadeloupe.

Astorga Y., Impact of the banana crops : the case of Costa Rica. International Banana Conference, Brussels 4-6 May 1998.

Ba A., Samba R., Sylla S., Le Roux C., Neyra M., Rousteau A., Imbert D., Toribio A., 2004. Characterization of the diversity of symbiotic microorganisms in *Pterocarpus officinalis* in swamp forests of Guadeloupe and Martinique. *Revue d' Ecologie -La Terre et La Vie* 59 (12): 163-170.

Baldock J. O., Schulte E. E., 1996. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. *Agronomy Journal*, Madison, v. 88, p. 448-456.

Bassette C., Bussiere F., 2005. 3-D modelling of the banana architecture for simulation of rainfall interception parameters. *Agricultural and forest meteorology* 129 (1-2): 95-100 MAR 28.

Beaufils, E. R., 1973. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). Pietermaritzburg: University of Natal, 132 p. (Soil Science Bulletin, 1).

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*; 18:311-346.

Bonan H and Prim J.L., 2001. Report on the presence of pesticides in water of human consumption in Guadeloupe. N° report 2001-070, Ministry for the Environment and Regional planning, Ministry for Employment and Solidarity. Paris.

Bowen W.T., Jones J.W., Carsky R.J., Quintana J.O., 1993. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. *Agron. J.* 85: 153-159.

Bussière F., Cattan P., Nouvellon A.- Rainfall partitioning in banana plantations, consequences on runoff risk potential on andisols (*soumis à J of Hydrol.*)

Cabidoche Y.-M., Dorel M., Paillat J.-M., Robin P., 2001. Inventory of the scientific and technical data available in the INSULAR DOM, relating to the nitrogen fertilization of the crops, their control, the aquifers functioning and the phenomena of nitrogen transfer in the environment and their incidence. Study to Ministry for the Environment and Regional planning, Direction of Water. APC INRA Antilles-Guyane, 68p.

Cattan P., Cabidoche Y.M., Lacas J.G., Voltz M., 2005. Occurrence of runoff on high infiltrability andosol under two banana cropping systems. *Soil Tillage Research*.

Castillo L.E., Ruepert C., Solis E., 2000. Pesticide residues in the aquatic environment of banana plantation areas in the north Atlantic zone of Costa Rica. Environ. Toxicol. Chem. 8 1942-1950.

Champion J., 1963. Le bananier. Techniques agricoles et productions tropicales. Maisonneuve et Larose, Paris, France, 263 p.

Champion J. et D. Sioussaram., 1970. L'enracinement du bananier dans les conditions de la station de Neufchâteau (Guadeloupe). Fruits 25:847-859.

Chotte J.L., Feller C., Vallony M.J. and Nicolardot B., 1994. Disponibilité de l'azote dans les sols cultivés des Petites Antilles. Agric. Développement 4 : 23-30.

Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.M., Meynard. J.M., 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of French West Indies. Soil Use and management, 20, 105-113.

Cocu N., 1999. La carte des sols de la Martinique comme support pour le cadrage de sites et la gestion agronomique : exemples dans la vallée de la Lézarde. Rapport de fin d'études. FUSAG, Gembloux, Belgique. 72 pages + Annexes.

Colmet-Daage F., Lagache P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. III, 2, 91-122.

Corbeels M., O'Connell A.M., Grove T.S., Mendham D.S. and Rance S.J., 2003. Nitrogen release from legume and eucalypt residues as affected by their biochemical quality and degree of contact with soil. Plant and Soil 250: 15-28.

Declerck S., Plenchette C., Strullu D.G., 1995. Mycorrhizal dependency of banana (*Musa accuminata*, AAA group) cultivar. Plant and Soil 176 : 183-187.

Dubach M. and Russelle M., 1994. Forage legume roots and nodules and their role in nitrogen transfert. Agron.J. 86: 259-266.

Dubrulle P., Machet J.M., Damay N., 2003. Azofert : a new decision support tool for fertilizer recommendations. In "Controlling nitrogen flows and losses". 12th Nitrogen Workshop-21st-24th September, exetre, devon, UK, 500-501.

Elwali, A.M.O., Gascho, G.J., 1984. Soil testing, foliar analysis, and DRIS as guide for sugarcane fertilization. Agronomy Journal, v.76, p.466-470.

Feller C., 1986. Utilisation des résidus de canne à sucre dans un agrosystème tropical : effet sur la nutrition minérale de la plante et sur le stock organique du sol. Etude avec ¹⁵N.

Fillery I.R.P. and Recous S., 2001. Use of enriched ¹⁵N sources to study soil N transformations. In stable Isotope techniques in the study of Biological processes and functioning of elorypteurs. M.J Unkovitch, D.J. Gibbs, J.S. Pate and A.M. mc Neill eds. Klunwer Academic Publishers, Dvidrecht (NL), 167-194.

Fogain R., Njifenjou S., Kwa M., Declerck S., Lowe J., Mycorhization précoce et croissance de deux types de matériel végétal de plantain (*Musa AAB*). Cahiers d'études et de recherches

francophones / Agricultures. Volume 10, Numéro 3, 195-7, Mai - Juin 2001, Notes de recherche.

Ganry J. 2001. Mastery of banana cultivation for rational production facing new challenges. Maîtrise de la culture du bananier pour une production raisonnée face aux nouveaux défis. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France 87 (6): 119-127

Garnier P., Néel C., Mary B., Lafolie F., 2001. Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. European Journal of Soil Science, 52, 253-268.

Gaumand C., Gravau A., Verdelon X., Vernerey M., 2005. Evaluation des actions menées en rapport avec la présence de chlordécone et autres pesticides organochlorés en Guadeloupe et en Martinique. Synthèse de rapports d'enquête de l'Inspection Générale des Affaires Sociales (Rapport n°2005.042), du Comité Permanent de Coordination des inspections du Ministère de l'Agriculture (Rapport COPERCI 2005 n°30), de l'Inspection Générale de l'Environnement (Rapport n° IGE 041056) et de l'Inspection Générales des finances (Rapport n°2005 M.004.01).

Godefroy J., 1975. Evolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'ananas. Relation avec la structure et la capacité d'échange cationique, Université de Nancy: 166

Godefroy J., Dormoy M., 1983. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans les sols des bananeraies martiniquaises. Fruits 38 (5); (6): 373-387; 451-459.

Godefroy J., Dormoy M., 1989. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe « sol-bananeraie-climat ». Application à la programmation de la fumure. IV-Cas des sols brun-rouille à halloysite. Fruits. 44, 3-12

Godefroy J., Dormoy M., 1990. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans un ferrisol de Martinique sous culture bananière. Application à la programmation de la fumure. Fruits, vol. 45, n°2, 93-101.

Godefroy J., Guillemot J., 1975. Action comparée des apports d'urée et de sulfate d'ammonium sur les caractéristiques chimiques d'un sol de bananeraie. Relation avec la productivité. Fruits, vol. 30, n°1, 3-10.

Godefroy J., Martin Ph., 1969. Evolution des éléments minéraux du sol dans un essai de fumure minérale en bananeraie de basse Côte d'Ivoire. Fruits, vol. 24, n°9-10, 425-435.

Gouyer, S., 2001. Evaluation du transport par ruissellement de surface sur andosol. Mémoire de fin d'étude, ISTOM.

Greenwood D.J., Lemaire G., Gosse G., Cruz P., Draycott A., Neeteson J.J., (1990). Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. Annals of botany. 66, 425-436.

Hallmark, W.B.; Beverly, R.B., 1991. Review and update in the use of the Diagnosis and Recommendation Integrated System. Journal of Fertilizer Issues, v.8, p.74-88.

Humphreys, L.R. 1987. Tropical pastures and fodder crops. 2nd ed. John Wiley & Sons, New

York.

Jannoyer, M. 1995. Déterminisme du nombre d'organes reproducteurs d'une inflorescence de bananier (*Musa acuminata*, cv. *Grande Naine*). These Ina-Pg. 174 pp.

Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Huche-Thelie L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74: 397-407.

Khamsouk B., 2001. Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

Lassoudière A. 1978. Some aspects of the growth and the development of the banana tree 'Poyo' in Ivory Coast. 2. The radical system. *Fruits* 33:314-338.

Lassoudière A., 1980. Comportement du bananier Poyo au second cycle.IV-Mise en évidence d'interactions entre rejet et pied mère et entre rejets frères. *Fruits*. 33, 314-338.

Lecompte F.; Ozier-Lafontaine H.; Pages L., 2001.The relationships between static and dynamic variables in the description of root growth. Consequences for field interpretation of rooting variability. *Plant and Soil* 236 (1): 19-31.

Lecompte F.; Vaucelle A.; Pages L.; Ozier-Lafontaine H. 2002. Number, position, diameter and initial direction of growth of primary roots in *Musa*. *Annals of Botany* 90 (1): 43-51.

Lekasi J.K., Bekunda M.A., Woome P.L. and Tenywa J.S., 1999. Decomposition of Crop Residues in Banana-based Cropping Systems of Uganda. *Biological Agriculture and Horticulture*. Vol. 17 (1) 1-10.

Lekasi, J.K., Woome, P.L. and Bekunda, M.A., 2001. Mulching cabbage with banana residues affects yields, nutrient supply, soil biota, weed expression and soil moisture. *African Crop Science Journal* .

Lemaire G., Gastal F., Plenet D., Le Bot J., 1996. Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. In *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes* (Lemaire G. et Nicolardot B., eds). Les colloques de l'INRA, 83, INRA éditions, Versailles.

Lemaire G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. *Agronomie* 4 (5): 423-430.

Limaux F., 1999 - Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Thèse Doctorat, INPL, Nancy, 167 p.

Loiseau P. and Decau M.L., 1995. Mineralization and organization of nitrogen, in prairiaux soils estimates at harvest from data of shoots labelled with ¹⁵N. In : *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, INRA Editions, Paris, Les colloques de l'INRA, 70, 299-314.

- Lopes, A.S., 1998. Manual internacional de fertilidade do solo. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS. 177p.
- MacDonald L., Jebellie S.J., Madramootoo C.A., Dodds G.T., 1999. Pesticide mobility on a hillside soil in St Lucia. *Agric Ecosyst. Environ.* 72, 181-188.
- Machet J.M., Dubrulle P., 1990. Azobil: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method, in: Scaife A. (Ed.), Proceedings of first congress of the European Society of Agronomy, Paris.
- Machet J.M., Recous S, Jeuffroy MH, Mary B, Nicolardot B, Parnaudeau V., 2003. A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertiliser N advice. In "Controlling nitrogen flows and losses", 12th Nitrogen Workshop-21st-24th September, Exeter, Devon, UK, 191-193.
- Mando A., 1997. The role of termites and mulch in the rehabilitation of crusted Sahelian soils. Wageningen Agricultural University. Tropica resource management papers.
- Martin-Prevel P., 1990. Past, present and future of tropical fruit nutrition with special reference to the banana, *Acta Horticulturae* 275, tropical and subtropical fruits.
- Mary B., Recous S. 1994. Measurement of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a means of predicting net mineralization. *Eur. J. Agron.*;3(4):291-300.
- Molina JAE, Clapp CE, Shaffer MJ, Chichester FW, Larson WE., 1983. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration, and behaviour. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 85-91.
- Martin-Prevel P., Montagut G., 1966. Test soil-plant on banana tree. Nitrogen dynamics in the growth and the development of the plant. *Fruits*. 21, 6, 283-294.
- Montagut, G.; Martin-Prével, P., 1965. Requirement in fertilizer for the West-Indies banana plantations. *Fruits*, Paris, v.20, n.6, p. 265-273.
- Murphy T.R., 1998. Turfgrass Weed Control for Professional Managers. The University of Georgia College of Agricultural and Environmental sciences, Cooperative Extension Service, Bulletin 991.
- Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B. 2001. Similation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil* 228: 83-103.
- Nouvellon, Y., 1999. Modélisation du fonctionnement de prairies semi-arides et assimilation de données radiométriques dans le modèle. Thèse de docteur ingénieur agronome de l'Institut National Agronomique Paris, France.
- Perrier X., 1986. Number and size of agronomic experimentation plots with plants having great vegetative development. Application to the case of the banana tree. *Fruits* vol.41, n°3.
- Prasertsak P., Freney J.R., Saffigna P.G., Denmead O.T. and Prove B ;G., 2001. Fate of urea applied to a banana crop in the wet tropics of Queens land. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59 : 65-73.

Recous S., Loiseau P., Machet J.M., Mary B. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies, 1997. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes Reims (France), 19-20 novembre 1996. Ed. INRA, Paris 1997 (les Colloques, n° 83).

Recous S. and Machet J.M., 1999. Short term immobilization and crop uptake of fertilizer N applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant and Soil*, 206, 137-149.

Recous S., Nicolardot B., Simon J.C., 1996. Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines. *In* : L'eau dans les agrosystèmes, Collection « mieux comprendre », INRA Editions, Paris (sous presse).

Recous S., Robin D., Darwis D., Mary B., 1995 Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.* 1995;27:1529-1538.

Rémy , J. C. et Hébert M., Le devenir des engrais azotes dans le sol, 1977. *C.R. Acad Fr.*, 11, 700-714.

Rémy, J. C. et Marin-Laflèche A., 1976. L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'humus. *Entreprises Agricoles* (Novembre): 63-67.

Roggy J.C., Moiroud A., Lensi R., adn Domenach A.M., 2004. Estimating N transfer between N₂-fixing actinorhizal species and the non-N₂-fixing *Pinus avium* under partially controlled conditions. *Biol. Fertil. Soils* 39 : 312-319.

Roose E., 1968. Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. *Cahiers ORSTOM, pédologie*, VI.2 :235-249.

Roose, E.; Khamsouk, B.; Lassoudière, A.; Dorel, M., 1999. Origine du ruissellement et de l'érosion sur sols bruns à halloysite de Martinique. Premières observations sous bananiers. Meeting: Colloque International 'L'homme et l'érosion, Yaoundé (CMR), 1999/12/09-19 Bulletin Réseau Erosion ORSTOM (FRANCE), (19).

Salette J. et Lemaire G. (1981). Sur la variation de la teneur en azote de graminées forragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris.* 292, 875-878.

Sansoulet J, Cabidoche Y.M, cattan p., Clermont Dauphin c., Desfontaines L., Malaval C. 2004. Solute transfert in an andisol of the french West Indies after application of KNO₃ : from the aggregate to the field experiment. *In* : Volcanic soil resources in Europe. COST Action 622 final meeting. Abstracts. – 2004 – Oskarsson H., Arnalds O., p.11-112. *Congres : Volcanic Soil Resources I Europe, Akureyri (ISL), 2004/06/04-08 RA1a Report (ISL), (214).*

Sierra J., Brisson N., Ripoche D., Noël C., 2003. Application of the STICS crop model to predict nitrogen availability and nitrate transport in a tropical acid soil cropped with maize. *Plant and Soil (NLD)*, 256 : 333-345.

Sierra J., Fontaine S., and Desfontaine L., 2001. Factors controlling N mineralization, nitrification, and nitrogen losses in an Oxisol amended with sewage sludge. *Aust. J. Soil Res.* 39 : 519-534.

Sierra J. and Marban L., 2000. Nitrogen mineralization pattern of an oxisol of Guadeloupe, French West Indies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2002-2010.

Sierra J. and Nygren P., 2005. Role of root inputs from a dinitrogen-fixing tree in soil carbon and nitrogen sequestration in a tropical agroforestry system. *Australian Journal of Soil Science*.

Strong W.M., 1995. Nitrogen fertilization of upland crops. In : Bacon P. (ed) *Nitrogen Fertilization in the Environment* pp129-169. Marcel Dekker, New York.

Teixeira, L. A. J., Santos, W. R. D., Bataglia, O. C. 2002. The N and K diagnosis on banana plants using the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) and critical value approach. *Rev. Bras. Frutic.* 24.2: 530-535. ISSN 0100-2945.

Thieuleux L., Ozier-Lafontaine H., Lassoudière A. Nitrogen Uptake of banana crops with increasing plant mass: determination of critical nitrogen dilution curves according to crop age. 2006. (Submitted).

Tixier P.; Malezieux E.; Dorel M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling* 180 (2/3): 407-417

Tremblay N., Scharpf H. C., Weier U., Laurence H. et Owen J., 2001. Régie de l'azote chez les cultures maraîchères - Guide pour une fertilisation raisonnée.

Trinsoutrot I.; Recous S.; Bentz B.; Linères, M., Chèneby, D., Nicolardot, B., 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal* 64 (3): 918-926

Trojan M.D., Linden DR., 1998. Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal*, 62 : 1687-1692.

Valentin C., Bresson L.M. 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55 : 225-245.

Van Soest P.J. 1963. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. I. Preparation of fiber residues of low nitrogen content. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 46:825-835.

Walworth, J.L.; Sumner, M.E. the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in Soil Sciences*, v.6, p.149-188, 1987.

Woomer, P.L., Bekunda, M.A. and Bwamiki, D. 1998. Modelling banana growth and soil organic matter dynamics with the century model. *African Crop Science Journal* 6:205-214.

Yao N., 1989. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans un sol hydromorphe sous culture bananière dans le Sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits*, vol. 44, n°10, 521-528.

« Biodisponibilité de l'azote en cultures bananières »
UNE THESE
DES COMPETENCES en :
Conduite de projet, protection de l'environnement, développement agricole

AVANT PROPOS

Le programme « Valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse », conduit par l'Association Bernard Gregory pour le compte du Ministère en charge de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, avec le soutien du CNRS, du CEA et de la Région Ile-de-France, permet depuis quelques années aux doctorants de réaliser une **analyse du déroulement de la thèse** dans une optique de **projet**, et une **identification** et une **mise en valeur** des **acquis professionnels** et des **compétences** qu'ils ont développés pendant leur thèse.

Les doctorants ne pouvant pas ou ne voulant pas continuer dans le domaine de la recherche (voir rapport du Céreq, n°220, juin 2005) peuvent ainsi mieux valoriser leurs travaux vis-à-vis d'un employeur extérieur au monde de la recherche publique française. Cette expérience en est maintenant à sa cinquième année. L'Association Bernard Gregory est maître d'oeuvre : 224 doctorants de 78 écoles doctorales participent à l'exercice.

Par cette expérience, j'espère contribuer à la **réflexion des autres doctorants et jeunes chercheurs**, pour qui j'œuvre au sein de l'Association des Jeunes Chercheurs de L'Université des Antilles et de la Guyane (AJC) en tant que vice-présidente.

1. INTRODUCTION

L'expérience écologique des pays de l'Union Européenne a montré la **nécessité d'anticiper sur tous les problèmes environnementaux** liés aux pollutions agricoles diffuses en grande culture. Les flux d'azote liés aux productions agricoles, et leur impact sur la potabilité de l'eau justifient les actions à engager sur des zones tropicales insulaires européennes comme les Antilles françaises.

Les systèmes de culture intégrant la **banane**, en monoculture ou en rotation avec des cultures telles que la canne à sucre ou l'ananas, occupent aux Antilles françaises une **part importante de la surface agricole utile** (15 % en Guadeloupe et 30% en Martinique). Ces bassins de production sont soumis globalement à une forte pluviométrie entraînant des flux de ruissellement et d'infiltration importants. Le risque de pollution est aggravé par l'utilisation dans ces systèmes de culture, de fortes quantités d'engrais (jusqu'à 400 kg N par hectare et par an).

L'évaluation de l'impact environnemental des pratiques et le raisonnement de la fertilisation des monocultures intensives, dont la banane constitue un pôle extrême, constituent un enjeu central dans la protection du milieu. L'étude des risques de pollution associée au lessivage des nitrates dans un contexte de production donné, nécessite une compréhension des mécanismes de **transformation / évolution de l'azote au cours du cycle de la culture**.

La dernière loi d'orientation agricole de 1991, confiée à l'exploitation agricole, dans le cadre des Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE), de nouvelles fonctions en termes de préservation de l'environnement et de maintien/développement de l'emploi en milieu rural, en d'autres termes cette loi définit la **multifonctionnalité des exploitations agricoles**.

Dans ce cadre, l'Institut National de la Recherche Agronomique (**INRA, Unité APC**) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (**CIRAD, Unité UPR26**) ont programmé des études portant sur les modalités de mutation des systèmes et des

itinéraires techniques afin que la culture bananière réponde aux exigences de multifonctionnalité de l'agriculture (viabilité économique, respect du cadre de vie, respect de l'environnement). Ces études sont financées dans le cadre du Document Unique de Programmation (DOCUP) de la Martinique pour la période 2000-2006.

L'Unité de Recherche Agropédoclimatique (UR-APC) de l'INRA est une unité pluridisciplinaire qui rassemble actuellement des équipes des Départements " Environnement et Agronomie" et " Sciences Sociales, Agriculture et Alimentation, Espace et Environnement", au sein de l'unique Centre INRA situé en zone tropicale. L'Unité APC a pour mission de contribuer à l'innovation nécessaire au développement d'une **agriculture à faible niveau d'intrants en milieu tropical, performante et respectueuse de l'environnement**. Ses programmes ont pour objet "l'étude intégrée du fonctionnement d'associations culturales en vue de la conception de systèmes de culture innovants à moindres intrants".

L'Unité Propre de Recherche 26 du CIRAD (UPR26), présente dans le Pôle de Recherche Agronomique de la Martinique (PRAM), a en charge l'« **étude des risques de pollution d'origine agricole en Martinique et en Guadeloupe et de l'impact des pratiques culturales raisonnées sur la qualité de l'eau des systèmes de culture de banane et d'ananas** ». Les objectifs principaux de ce projet d'unité sont de préciser les risques de pollution, notamment en nitrates, en fonction de la dynamique de l'eau, pour mettre au point des systèmes de culture raisonnés et identifier les alternatives permettant de faire évoluer les pratiques agricoles actuelles. Il s'agit d'une approche environnementale des systèmes de culture qui implique un diagnostic objectif des pollutions agricoles et l'étude de leur dynamique dans un souci de mener des actions efficaces pour les maîtriser.

C'est dans ces 2 projets d'unités travaillant en collaboration, que ma thèse intitulée «**évaluation de la biodisponibilité de l'azote en culture bananières sur ferrisol : application à la gestion de la fertilisation azotée**» s'inscrit. Il s'agit d'évaluer les contributions au bilan de l'azote des principales sources (sol, engrais, résidus) et puits (immobilisation, organisation, lessivage, ruissellement) au sein d'une culture bananière. Ceci afin d'acquérir les connaissances nécessaires à la réflexion de la manipulation-optimisation de ces sources et puits à l'aide de modèles existants et permettre l'ajustement des apports d'engrais en fonction de l'azote minéral disponible dans le sol et des besoins de la plante.

Les enjeux scientifiques sont d'apporter des **connaissances fondamentales** concernant (i) les besoins en azote critique de la banane, (ii) l'efficacité de l'engrais azoté en bananeraie, (iii) l'évaluation des pertes de nitrates et leur hétérogénéité à la parcelle, du fait de l'interception de la pluie par le bananier, et enfin, (iv) la quantification des apports d'azote par la minéralisation de la matière organique du sol et la décomposition des résidus.

Les enjeux économiques et sociaux sont la **préservation de la qualité d'une ressource en eau limitée**, tout en maintenant une agriculture productive et économiquement viable.

2. VERS PROJET DE THESE

Petit historique

Mon engagement en thèse a été déterminé à la fois par mes **objectifs professionnels** et par **l'opportunité de compléter ma formation initiale** sur un sujet d'intérêt économique, social et scientifique. Mon choix de formation fait suite à une réflexion entamée depuis l'année où j'ai commencé mes études supérieures (1997). Deux domaines attiraient mon attention : **l'agro-alimentaire et l'agronomie** ; d'une part à cause de mon goût pour les sciences du vivant, et d'autre part, à cause de mon désir d'aider au développement de ma région d'origine. Ces domaines étaient attrayants car ils jouent un rôle fondamental dans l'aide aux agriculteurs qui « nourrissent » la société et peuvent permettre à différents niveaux d'aider au développement durable des Antilles

françaises et de la Caraïbe. De plus, ils présentaient des débouchés possibles en termes d'emploi dans ces zones géographiques.

Afin de m'orienter de façon plus précise, j'ai décidé de réaliser des visites de terrain et de rencontrer des professionnels pour avoir une idée concrète des tâches quotidiennes d'un ingénieur en agroalimentaire. J'ai donc visité des usines agro-alimentaires en Martinique.

Mon analyse de ces visites m'a permis de me rendre compte que le métier que je souhaitais exercer par la suite devait me permettre de mettre en œuvre ma **curiosité scientifique**, tout en aidant au **développement local**, mais avec une approche plus fondamentale de l'agriculture. J'ai donc décidé de poursuivre ma formation vers l'**agronomie**, et si possible jusqu'au **doctorat**, afin de pouvoir exercer le métier de chercheur, c'est à dire d'être capable de contribuer à des choix collectifs de priorités d'apport à la connaissance, compatibles avec des compétences et objectifs collectifs de laboratoire. Dans ce contexte, chacun doit enrichir les choix collectifs, tout en réalisant ses choix personnels. Ce n'est ni plus ni moins que la règle de base de n'importe quelle entreprise. Sauf que dans la science, le produit est de la connaissance, et le client plus difficile à définir : pairs, sociétés.

Formation universitaire initiale

J'ai suivi la formation permettant d'obtenir le Diplôme d'Etudes Universitaires Générales (DEUG) Sciences de la Vie Option **initiation à l'agronomie** à l'Université des Antilles Guyane (UAG) de 1997 à 1999. J'ai ainsi obtenu une mention très bien au module optionnel d'initiation à l'agronomie et une mention assez bien pour le DEUG. J'ai ensuite réalisé un **stage volontaire** de un mois à l'INRA de Guadeloupe à l'Unité de Recherche en Production Végétale (URPV), ce qui m'a permis en plus de l'initiation théorique, d'avoir une première approche pratique du métier de scientifique. Pour ce faire, j'ai dû rencontrer le chercheur susceptible de m'encadrer et lui **proposer ma candidature** pour la réalisation d'un stage volontaire. J'ai **écouté sa présentation** du sujet d'étude (innocuité des semenceaux d'igname à un champignon), **réalisé quelques expérimentations et rédigé un compte rendu des résultats**.

Cette expérience ayant été très satisfaisante, j'ai poursuivi mon cursus : **Licence de Biologie des Organismes** en 2000 à l'Université de Tours (Option programmation en C++), et **Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes** en 2001 à l'Université de Nantes (Options « environnement » et « génie génétique et environnement »). J'ai réalisé mon stage de maîtrise une nouvelle fois à l'INRA de Guadeloupe, mais cette fois ci, à l'Unité de Recherche Agropédoclimatique (APC). De nombreux échanges par mails et téléphone ont été nécessaires à l'obtention d'une proposition d'un sujet de stage dans cette unité (caractérisation d'une méthode non destructive d'estimation de la biomasse racinaire de plantes). Un accord a été trouvé concernant les modalités de réalisation du stage : durée d'un mois, paiement d'indemnités (150 euros, bien que cela ne soit pas la règle générale). J'ai également réalisé un stage en Loire-Atlantique en 2001 en partenariat avec l'Université de Nantes et le Comité Départemental du Développement Maraîcher (CDDM) dans le cadre d'un projet d'inventaire et d'identification des adventices de la région. Il s'agissait pour moi **d'acquérir une expérience dans le domaine de l'agronomie en zone tempérée** et d'avoir une idée de la généralisation possible de certaines méthodes d'études et de pratiques pour différentes zones climatiques.

Formation prédoctorale

Un Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) pluridisciplinaire en sciences exactes et naturelles intitulé « **Environnement Tropical et Valorisation de la Biodiversité** », s'étant ouvert à l'UAG, je suis revenue suivre cette formation pour poursuivre mes objectifs et effectuer mon doctorat aux Antilles. Avant le DEA, je suis allée en Martinique rencontrer des chercheurs susceptibles de me proposer un sujet de stage. J'ai rencontré un chercheur du CIRAD qui avait un projet d'étude concernant « **la mise au point d'outils de gestion de la fertilisation azotée en cultures maraîchères (tomate)** ». Suite à cet entretien, il a proposé son sujet de stage au responsable du

DEA et j'ai réalisé ce stage de 6 mois sous sa direction en collaboration avec un volontaire civil à l'aide technique (VCAT) et une personne en contrat d'insertion (CIA).

Pour mener à bien ce stage, j'ai dû, dans un premier temps, réaliser une synthèse bibliographique afin de comprendre l'objet du stage dans le projet d'étude, les mécanismes biologiques et formalismes mis en jeu dans le traitement du sujet. Pour le traitement des données et la rédaction du rapport de DEA, j'ai dû replacer le sujet dans son contexte économique, social et scientifique.

Il était clair dès le départ que ce stage ne pouvait déboucher sur la réalisation d'un doctorat puisque mon encadrant devait lui-même réaliser ce travail de thèse. J'ai donc, au cours du stage de DEA, recherché des opportunités de thèse en discutant avec d'autres chercheurs du CIRAD.

L'obtention du DEA avec une mention bien et une première place dans le classement des étudiants a marqué le point de départ de la réalisation de mon projet de thèse.

La thèse proprement dite

C'est suite à la préparation en interne de ma soutenance de DEA qu'un chercheur senior du CIRAD du programme « bananes plantains et ananas » m'a proposé de poursuivre en thèse dans son unité (UPR26). Il a émis une idée de thèse, concernant l'amélioration de la fertilisation azotée en bananeraie, que je devais traduire en projet de thèse.

La culture bananière est une culture d'exportation avec des retombées économiques importantes et une utilisation de 30% de la surface agricole utile en Martinique. Cette culture m'a ainsi paru être intéressante à étudier du fait de l'impact qu'elle pouvait avoir sur l'environnement de l'île. Ayant des connaissances liées à la gestion de la fertilisation azotée, à la problématique scientifique du sujet, au contexte socio-économique, et aux techniques d'analyses (réalisation de courbe de dilution), j'ai décidé de réaliser une thèse sur ce sujet.

Le sujet de thèse choisi, l'encadrement défini et les financements (voir ci-après) trouvés, le projet de thèse pouvait démarrer dans de bonnes conditions.

3. CONDUITE DU PROJET « THESE »

Encadrement de la thèse, cadrage du projet et conception du protocole expérimental

L'encadrement de la thèse était limité du fait que ce chercheur senior du CIRAD ne possédait pas d'habilitation à diriger des recherches (HDR). J'ai donc **fait appel** au chercheur ayant encadré mon stage de maîtrise car il possédait une HDR. Je lui ai **proposé** d'encadrer ma thèse en partenariat avec le chercheur senior du CIRAD. Il a accepté et il a donc fallu officialiser le projet de thèse et sa direction par la **réaction d'un contrat INRA-CIRAD**.

Mon inscription en thèse a donné lieu également à la **signature d'une charte des thèses** entre mon directeur, l'UAG et moi.

Des accords bilatéraux entre ces organismes ont donc été pris par le biais des chercheurs en question qui ont ensuite fait remonter le document à leur hiérarchie pour accord. Ces accords ont permis d'adapter la politique visant à faire travailler les organismes de recherche en partenariat aux besoins spécifiques du terrain (dans ce cas l'encadrement d'une thèse) par le partage des rôles et responsabilités entre les acteurs impliqués.

Mon directeur et moi avons convenu de **constituer un comité de thèse** afin de permettre le suivi de l'étude par des experts choisis en fonction de leurs compétences dans des champs d'expertise pertinents quant aux questions abordées :

- INRA-APC, Guadeloupe : Fonctionnement des sols tropicaux, Cycle du carbone et de l'azote dans les systèmes de culture en zone tropicale, Modélisation du fonctionnement sol-racines.

- CIRAD UPR26, Guadeloupe: Agronomie de la banane, Physique du sol, Irrigation, fertilisation, conduite de la culture.

Le **cadrage thématique** a été réalisé à l'occasion d'une réunion du comité de pilotage de la thèse au mois d'octobre 2002, en Martinique. Cette réunion m'a permis de recentrer la problématique scientifique de ma thèse autour de questions originales relatives au cycle de l'azote, et de définir les premières hypothèses. Durant cette période, j'ai réalisé un important investissement de **synthèse bibliographique** portant sur 200 articles, 5 thèses et une dizaine de rapports (dont environ les 2/3 sont rédigés en anglais). Cette étude a eu pour objet de **décomposer en éléments simples une situation globale complexe** afin d'en **dégager les problématiques** et de **replacer ce projet dans son contexte scientifique**, puis de **décrire** les relations entre les éléments afin de **proposer** des méthodes pour les étudier.

Ce cadrage s'est affiné lors d'une réunion du comité de pilotage au mois de novembre 2002 en Martinique, qui m'a permis de rédiger un projet expérimental réaliste.

J'ai réalisé une mission d'une semaine au mois de décembre 2002 en Guadeloupe afin de prolonger cette réflexion en relation avec d'autres spécialistes de l'INRA, du CIRAD. Cette synthèse, complétée par l'avis d'autres spécialistes de l'IRD, du CIRAD et de l'INRA de l'hexagone et de l'étranger s'est traduite (i) par la **rédaction du projet de thèse** (15 p + annexes), intitulé : "Etude de la biodisponibilité de l'azote dans les cultures bananières sur ferrisol: application à l'élaboration d'un modèle de gestion pour l'azote", et par la **rédaction d'une présentation très détaillée du protocole expérimental** de la thèse (22 p) comprenant une reformulation d'une question agro-environnementale en questionnement et objectifs scientifiques et la conception d'un dispositif expérimental et de protocoles de mesures originaux pour tester les hypothèses formulées.

Mise en place d'un réseau de relations et de partenariats

A de nombreuses occasions, j'ai pu avoir de larges **échanges** scientifiques avec des chercheurs de renommée internationale, des étudiants d'autres universités de la Caraïbe, des étudiants effectuant une thèse sur les trois Pôles de l'UAG (Guadeloupe, Martinique, Guyane) dans des domaines très divers. Les occasions de rencontre ont été notamment un colloque international, des Universités d'été en Martinique et en Guadeloupe, les Assises de la recherche en Amazonie, des formations et des séjours méthodologiques dans l'hexagone. Ces rencontres m'ont permis de **construire un réseau personnel de collaboration** qui a contribué au bon déroulement de ma thèse à différents niveaux.

Ma Participation au 12^{ème} Workshop sur l'azote en Angleterre en décembre 2002 m'a permis d'**évaluer l'originalité de mon projet** par rapport aux études menées au niveau international et j'ai pu rencontrer d'autres experts que j'ai invité à rejoindre mon comité de pilotage :

- INRA, Laon : Sciences du Sol, fonctionnement des sols cultivés spécialiste du cycle de l'azote (étude à l'azote 15, isotope non radioactif de l'azote).
- CIRAD Amis, Montpellier : Sciences du Sol, fonctionnement des sols cultivés spécialiste du cycle de l'azote (étude à l'azote 15).

Les échanges avec les scientifiques et doctorants travaillant dans le même domaine de recherche que le mien m'ont amenés à **réexaminer le niveau récent de compréhension** des sujets traités, à **identifier les manques de connaissances** de cette communauté et à **réfléchir aux futures recherches requises**.

Les chercheurs en mathématiques et informatique de l'UAG Martinique ont répondu à certaines de mes interrogations concernant l'échantillonnage au champ. Ils m'ont permis d'**approfondir mes connaissances en statistiques** et m'ont aidée pour l'analyse de certaines données.

Les relations que j'ai pu développer avec le laboratoire du CIRAD Amis (Unité recyclage et risques) de Montpellier m'ont permis de réaliser gratuitement des analyses de la composition

biochimique de végétaux, et de **vérifier la qualité de mes analyses** d'azote minéral faites au laboratoire du PRAM. De même les relations développées avec le laboratoire d'azote de Laon, lors d'un séjour méthodologique, m'ont permis d'**apprendre la méthode** de préparation d'échantillons d'extraits KCl (chlorure de potassium) pour le dosage d'azote 15.

Les rencontres de doctorants en sciences exactes et sciences humaines lors de ma participation aux Universités d'été des Antilles Guyane 2003 et 2004, et aux Assises de la Recherche en Amazonie en Guyane en 2004, m'ont permis de comprendre la généralité du traitement d'un sujet de thèse, d'obtenir des informations sur les différentes thématiques de recherche sur et dans la Caraïbe et de me **sensibiliser aux problèmes matériels et relationnels** rencontrés par tous les doctorants. Ces rencontres sont d'ailleurs à l'origine de mon engagement dans l'association des jeunes chercheurs de Guadeloupe.

Les exemples de contribution de ce réseau de relations au bon déroulement de ma thèse sont encore nombreux et donc impossibles à lister de façon complète. Je dirais donc pour conclure ce paragraphe que les relations humaines établies au cours de ma thèse m'ont permis **d'obtenir les connaissances nécessaires**, en termes **technique et méthodologique**, pour atteindre les objectifs de ma thèse, **nourrir mes réflexions afin d'élargir mes perspectives d'analyses** et **avancer** dans mes recherches. Elles ont aussi contribué de façon plus personnelle, à me soutenir moralement dans mes travaux par des encouragements, des attentions, et au maintien d'une ambiance de travail amicale à laquelle j'espère avoir contribué.

Mise en place et gestion du budget

J'ai effectué **des demandes de financements** auprès du ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur, de la recherche et de la technologie (MENRT, 12 000 euros par an). Cette bourse m'a été attribuée après négociation avec le président de l'UFR sciences exactes et naturelles (qui gère les bourses pour le ministère), le responsable du DEA et le directeur de l'école doctorale puisque cette dernière ne m'avait pas été attribuée de façon automatique comme cela aurait dû se faire du fait de mon classement à l'issue du DEA

La direction du CIRAD a étudié le projet de thèse et les demandes de financement pour la réalisation de la thèse et a accordé les subventions nécessaires au fonctionnement du projet (soit 30 000 euros environ DOCUP + BCRD), et ce d'autant plus facilement que mon salaire n'était pas à leur charge puisque je me suis présentée munies d'une bourse pour réaliser ce projet.

Au cours de ma thèse, du fait de la politique de formation de mon responsable au CIRAD, j'ai **géré personnellement les enveloppes budgétaires** attribuées à mon étude, à savoir le budget de fonctionnement DOCUP FEOGA (20 000 euros environ) et le BCRD CIRAD (5000 euros par an pour chaque doctorant). J'ai dû **préparer un budget global** pour la réalisation du projet avec des réajustements chaque année en fonction des dépenses (fonctionnement, investissement). J'avais également pour tâche de passer les commandes de matériels en **négociant les meilleurs prix auprès des fournisseurs** (azote marqué, réalisation de poster, analyses, matériel de terrain, etc.). Ainsi, ma collaboration avec le laboratoire de l'INRA de Laon, où ont été réalisées nos analyses d'azote 15, m'a permis d'obtenir la division par 2 de la facture des analyses soit 4000 euros environ.

J'ai **rédigé les éléments** concernant la présentation des résultats de mes travaux que j'ai remis à mon responsable CIRAD afin qu'il complète le rapport de DOCUP FEOGA 2003 et 2004. J'ai **négocié avec ma direction CIRAD** des missions de formation financées par le BCRD CIRAD pour les doctorants. J'ai ainsi pu assister à un colloque international en Angleterre, à une formation en modélisation à Avignon et à une formation en communication orale et écrite en anglais à Montpellier. Des négociations ont été nécessaires également dans certains cas pour obtenir des budgets supplémentaires. J'ai du notamment négocier avec la direction du CIRAD, la venue en

mission de deux nouveaux membres pour mon comité de pilotage un chercheur du CIRAD Montpellier et un de l'INRA de Laon. J'ai également négocié avec l'Ecole doctorale le financement de ma participation aux Universités d'été et aux assises de la recherche en Amazonie.

Voir en annexe le bilan financier de la thèse.

Réalisation et conduite des expérimentations

Les travaux de préparation des parcelles expérimentales et le suivi expérimental ont démarré fin avril 2003, en respect des délais fixés lors de la réunion du mois de novembre 2002, et ce grâce à l'engagement de 2 intérimaires pour pallier le manque de personnel.

La mise en place des essais sur des parcelles expérimentales du CIRAD, avec l'aide d'un technicien à reconvertir, 2 ouvriers agricoles et 2 intérimaires, nous auraient pris plus d'une semaine de lourd labeur, ce qui en termes de délais était trop long puisque cela risquait de compromettre la validité même de l'essai. J'ai donc demandé, en **prévision de ce risque**, la mobilisation de toute l'« équipe banane » soit une douzaine de personnes qui se sont relayées sur 2 jours avec l'aide d'une pelleuse pour mettre en place les lysimètres, instruments permettant la mesure du drainage et de la lixiviation.

Lors de la mise en place des essais de terrain, j'ai **mené des expérimentations préalables** afin de **définir une méthode fiable et rigoureuse** d'échantillonnage du sol et des plantes, sur les parcelles mises à ma disposition. Les résultats de ces essais préliminaires ont fait l'objet d'une note rédigée en janvier 2003 et ont permis la révision de certains éléments du projet initial en termes de nombre de répétitions des prélèvements et des analyses nécessaires.

Par ailleurs, lors de l'essai en plein champ permettant la mesure de l'efficacité de l'engrais azoté, j'ai **pris en charge personnellement les tâches délicates** de préparation des solutions marquées à l'azote 15, du fait des précautions techniques requises. La **rigueur** a été donc une qualité indispensable pour la réalisation de nombreuses tâches au laboratoire et au champ afin de permettre l'obtention de résultats fiables.

Par ailleurs, le déménagement du CIRAD dans les locaux du PRAM pour un rapprochement avec les chercheurs et techniciens des autres organismes de recherche (IRD : Institut de Recherche pour le Développement, CEMAGREF : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, et INRA), a facilité **la communication et les échanges de savoirs et de savoir-faire**. Dans ce cadre, sachant que la technicienne de l'IRD qui devait pratiquer des analyses pour mon étude serait bientôt mutée à Montpellier, je lui ai demandé de me former à l'utilisation de la technique de fractionnement granulométrique de la matière organique qu'elle pratiquait.

Les essais de terrain demandant un suivi quotidien, en termes de mesures notamment, un travail d'équipe organisé s'imposait. J'ai donc **géré le matériel de façon hebdomadaire** (achats réguliers de consommables), **réalisé des plannings** hebdomadaires et mensuels en tenant compte des congés fréquents de certains techniciens ayant des problèmes de santé et des périodes de travail des stagiaires. J'ai également **réalisé des fiches techniques** pour les relevés de données en **expliquant au préalable aux techniciens et ouvriers** en quoi consistaient les mesures. Ces explications étaient d'une grande importance durant les essais de terrain, puisque j'ai dû former au travail de terrain, outre les stagiaires, un technicien préposé pendant de nombreuses années à la préparation de matériel lourd. Cela suppose l'apprentissage de la rigueur des prélèvements de sol, la compréhension des théories sur lesquelles reposent notamment l'utilisation des sondes tensiométriques, de température, etc....

Les difficultés de son apprentissage ont engendré des profondes incompréhensions et parfois des heurts avec les ouvriers de terrain plus expérimentés, et j'ai alors fait en sorte de **renouer le dialogue** sur le terrain entre les techniciens et les ouvriers en étant souvent présente pour **éviter les conflits** et en tentant de montrer à chacun sa place et son importance dans l'équipe.

J'ai également **assuré une coordination permanente** entre les ouvriers et techniciens de terrain et le laboratoire, dans un souci d'efficacité et de rentabilité, en tenant en compte de la cohérence des exigences de la thèse afin de terminer les expérimentations dans les conditions de coût et de délai prévus.

Evaluation et gestion des risques

Au cours de la thèse des risques évalués se sont présentés que j'ai **géré par différentes alternatives**. Ces risques ont concerné principalement des problèmes survenus lors des campagnes de mesures mais aussi l'encadrement et le maintien de mon salaire (dans le cas d'un dépassement des délais de fin de thèse).

En ce qui concerne la campagne de mesure, j'ai dû faire face à des problèmes d'irrigation à la station de Rivière Lézarde en avril 2003, qui ont entraîné la perte des premiers vitroplants plantés, causant ainsi un retard d'un mois sur le début des mesures. Mon responsable au CIRAD a accepté de réaliser une nouvelle commande de vitroplants et **j'ai coordonné une nouvelle plantation** en mai 2003.

Entre janvier 2004 et août 2004, une seconde campagne expérimentale a été menée concernant le « devenir des résidus de culture au cours du cycle cultural ». Lors de cette campagne **j'ai réalisé des mesures complémentaires** au premier essai au cas où les résultats en cours de traitement n'auraient pas donné toutes les informations voulues. Lors de cette deuxième campagne de mesures, le retard dans la livraison de l'urée marquée à l'azote 15, m'a contraint à trouver une solution pour les apports à la parcelle et **j'ai opté pour un marquage en deux temps** au champ. Dans un premier temps sur les bordures où doivent se faire les prélèvements des plantes, et dans un deuxième temps, dans les cases de ruissellement pour le suivi de l'engrais dans le sol. Les résultats ont pu être obtenus cependant en temps voulu, c'est-à-dire après la récolte car les dates de prélèvements n'ont pas été modifiées.

Au laboratoire du PRAM, les appareils d'analyse étant en cours de maintenance donc indisponibles au moment opportun pour la réalisation de mes analyses, **j'ai pris l'initiative** d'envoyer certains de mes échantillons pour analyse dans un autre laboratoire (CIRAD Amis Montpellier ou INRA Guadeloupe) afin de **ne pas trop dépasser les délais prévus** initialement pour la restitution des résultats au deuxième comité de thèse.

Concernant l'encadrement, la mutation à Montpellier de mon responsable au CIRAD Martinique a été l'occasion de changer de laboratoire d'accueil et **j'ai ainsi choisi de déménager** en Guadeloupe pour être accueillie à l'INRA APC pour la fin de mes travaux. L'encadrement de la fin des travaux de thèse, soit la rédaction du rapport et d'articles scientifiques, reste donc assuré par une équipe compétente de chercheurs ayant à leur actif de nombreuses publications dans des journaux à comité de lecture.

Le dernier risque géré concerne le maintien de mon salaire dans le cas d'un dépassement des délais de fin de thèse suite à mon congé de maternité (16 semaines). J'ai contacté le directeur de mon Ecole Doctorale qui **sur ma proposition** a fait une demande de prolongation de mon contrat MENRT auprès du Président de l'Université et du Ministère de la Recherche. Ces demandes ont été acceptées, réglant ainsi mes éventuels manques de financement jusqu'au premier semestre 2006, période fixée pour la soutenance de ma thèse.

Traitement des données ; impacts scientifique, économique et social des résultats

Les données ont été obtenues en version papier, pour les relevés de terrain, et sous format électronique pour les sorties des centrales de mesures météo et les analyses de laboratoire. **J'ai choisi d'organiser** mes données de façon quotidienne ou hebdomadaire, car c'est un travail de

longue haleine (mise au format électronique de données papier et relevés de données de centrales de mesures avec un ordinateur portable). **J'ai traité les données** avec des logiciels de traitements statistiques génériques comme EXCEL mais également avec des logiciels plus spécifiques tels que XLSTAT ou MATLAB, et j'ai utilisé un modèle dynamique de cultures STICS. **J'ai rédigé un rapport** final de thèse qui est une **synthèse de l'étude** (150 pages) présentant l'état de l'art, les hypothèses de travail, les expérimentations mises en place, les résultats obtenus sous forme d'articles scientifiques, et leur discussion globale afin d'en préciser les limites et de proposer des perspectives de recherches.

Les **résultats majeurs de la thèse** concernent la quantification des différents termes du bilan de l'azote en bananeraies et l'explication de certains mécanismes sous jacents à l'élaboration de ces différents termes. Ainsi, les résultats obtenus montrent que les quantités actuelles de fertilisants apportées selon la gestion par le « seuil critique de pluviométrie » (SCP, 1987) soit environ 400 kg par hectare et par an (et jusqu'à 600 kg par hectare et par an dans certaines exploitations mécanisées) représentent plus du double des besoins de la culture bananière en premier cycle (150 kg par hectare) et plus de 8 fois ceux des cycles suivants (50 kg par hectare). Selon la bibliographie, 1/3 de l'azote de la plante proviendrait du sol. Par ailleurs, les sorties d'azote (nitrates dans les eaux de drainage) du système sol-plante que j'ai mesurées, montrent qu'une bananeraie en premier cycle de culture a des pertes d'azote par lixiviation plus importantes qu'une bananeraie établie mais que ces pertes ne représentent environ qu'un demi à un tiers des apports d'engrais azotés (120 kg par hectare) soit un quart des entrées totales d'azote estimées (engrais + minéralisation de la matière organique du sol). Les pertes totales d'azote restent donc relativement faibles par rapport aux quantités importantes d'azote entrant dans le système.

L'azote de l'engrais non absorbé par la culture serait donc organisé dans le sol ou perdu par volatilisation. Les essais que j'ai menés à l'aide du traçage isotopique de l'engrais, nous ont permis de confirmer qu'une part non négligeable de l'azote de l'engrais (40%) était organisée dans le sol, (notamment à cause des besoins des microorganismes pour la décomposition des résidus de culture) et pouvaient par la suite être reminéralisée et fournir ainsi une quantité non négligeable d'azote à la culture actuelle ou la suivante.

D'autres chercheurs de l'UPR26 et de l'INRA APC, suite à la diffusion en interne des premiers résultats de la thèse, ont été sensibilisés à la thématique de la gestion de la fertilisation azotée et ont d'ores et déjà **réorienté leurs travaux**, notamment sur la recherche d'indicateurs plante du statut azoté du bananier pour l'UPR26 Guadeloupe, et sur l'effet d'engrais avec des retardateurs de nitrification et l'apport en azote de différents résidus de culture pour l'UPR26 Martinique et l'INRA APC. **Les résultats de mes travaux ouvrent donc la voie à d'autres axes de recherches complémentaires au sein de mes laboratoires d'accueil.**

Au **niveau socio-économique** (filère de production et société), les premiers résultats de la thèse (présentation orale en 2004) ont déjà permis à un groupement d'agriculteurs de banane (SICABAM), de **prendre conscience** de l'impact négatif sur l'environnement que peut avoir la fertilisation azotée mal maîtrisée et la nécessité d'ajuster la fertilisation aux besoins de la culture pour limiter les risques de pollution des eaux et de l'air.

Les connaissances que j'ai apportées par ce travail de thèse nécessitent d'être approfondies et complétées si l'on veut juger de la nécessité de diminuer les apports d'engrais dans les systèmes de cultures bananières et, le cas échéant, obtenir des outils fiables de gestion de la fertilisation azotée. Parallèlement, ces recherches de connaissances scientifiques m'ont permis personnellement de mettre en oeuvre et d'acquérir des compétences.

4. COMPETENCES ACQUISES et QUALITES PERSONNELLES

Ce chapitre a pour objet de rassembler, à partir des illustrations des chapitres précédents, quelques compétences et qualités personnelles que j'ai développées lors de la réalisation de ma thèse. Pour mettre en place mon projet de thèse, j'ai **recherché un encadrement**, puis **cadré le projet** à partir d'une **analyse préalable du sujet** et des **systèmes d'acteurs** autour de la réalisation d'une thèse. Pour ce faire, mes connaissances, notamment des collectivités territoriales et du fonctionnement hiérarchique des organismes de recherche (CIRAD, INRA) et de l'université (UAG) m'ont été très utiles ; tout comme mon **savoir-faire administratif**. J'ai ensuite « **amorcé** » **la mise en place de contrat** entre les parties impliquées, et **négocié les financements** alloués à la réalisation de ce projet.

J'ai ensuite **conduit mon projet en concevant un protocole expérimental**, en **mettant en place un réseau personnel de relations et de partenariats**, en **gérant le budget** alloué au projet, en **réalisant des expérimentations**, et en **évaluant et en gérant les différents risques** qui se sont présentés.

J'ai **animé mon réseau** de relations de façon à permettre une efficacité des partenariats entrepris. Et j'ai dû, parfois, **arbitrer des conflits et des crises** entre les différents acteurs impliqués dans la conduite du projet. J'ai anticipé, évalué, et géré les risques rencontrés, de façon à permettre une production des résultats dans les coûts et les délais impartis. J'ai donc dû faire preuve d'une **organisation élaborée** pour mener à bien cette étude.

J'ai **analysé mes résultats** au travers de concepts établis pour la plupart, et en **généralisant de nouvelles hypothèses de recherches** pour d'autres aspects. Puis j'ai **rédigés mon rapport de thèse** de façon **synthétique** (150 pages) en **confrontant mes résultats à la bibliographie** et en y insérant des articles scientifiques que **j'avais rédigé en anglais** au préalable.

J'ai managé mon projet de thèse en gérant plusieurs sous projets transversaux et cela m'a permis d'intégrer des approches en finance et en comptabilité, en logistique, en ressources humaines, en contrôle de la qualité (soumission d'articles à des revues avec comité de lecture), en suivi de projets et en informatique. J'ai **participé en outre aux décisions stratégiques** d'orientation du sujet de thèse afin d'en optimiser les résultats lors des comités de thèse. Parallèlement, j'ai transmis à **mon équipe** (techniciens, ouvriers et chercheurs) la passion de mon sujet d'étude pour les fédérer autour d'un objectif commun : l'avancée de la science et le respect de l'environnement ! D'autres qualités personnelles n'ont pas trouvé d'opportunité de développement au cours de la thèse, notamment ma **capacité à enseigner** à des étudiants dans le cadre de cours théoriques à l'Université.

En parallèle à la conduite de la thèse, j'ai également **œuvré au sein du conseil d'administration de l'Association** des Jeunes Chercheurs en Guadeloupe ((association loi 1901) regroupant des maîtres de conférences, des docteurs, des doctorants et des étudiants de DEA de tous domaines qui tendent à **promouvoir, à vulgariser et à valoriser la recherche en Guadeloupe** et ce dans des disciplines et des thèmes de recherche touchant un grand nombre de questions d'actualité (**Aménagement du Territoire, Environnement, Energies renouvelables** etc.).

5. SYNTHÈSE

Ce dernier chapitre synthétise, à la lumière de l'analyse de la gestion de la thèse et de l'identification de l'ensemble de mes compétences, l'organisation de mes priorités professionnelles. Il illustre la transférabilité de mes compétences dans d'autres secteurs que celui de la recherche scientifique.

Ma formation jusqu'au doctorat en sciences agronomiques me permet de me présenter sur le marché de l'emploi avec l'objectif premier de trouver un emploi en tant que **chargé de recherches en agronomie** sur des thématiques concernant les **impacts sur l'environnement des systèmes de production** (compréhension et modélisation du fonctionnement des écosystèmes cultivés).

Le métier d'**enseignant chercheur** est également une possibilité d'emploi que j'envisage car c'est une activité qui, en plus de **faire progresser le savoir**, permet de le **transmettre** aux générations futures. Le lien actif enseignement - recherche permet d'être des acteurs de pointe et de garantir des formations pertinentes car sans cesse actualisées.

Les difficultés actuelles de la recherche en France m'obligent cependant à réfléchir sur la possibilité d'exercer d'autres fonctions permettant l'expression des compétences acquises.

Les **métiers de l'environnement dans le cadre du développement durable** offrent de bonnes perspectives de création d'emplois locaux et présentent des potentialités d'expansion rapide. L'emploi, longtemps en stagnation, commence lui aussi à prendre son essor. La dernière estimation (datant de 2002), fait état de 316 700 personnes travaillant dans le secteur : un tiers dans la sphère publique (Direction régionale de l'environnement DIREN, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME, Régions) et deux tiers dans le privé (entreprises, bureau d'étude). Les offres au niveau cadre augmentent régulièrement depuis le début des années 80, bien qu'une large partie du marché de l'emploi reste encore cachée (bouche à oreille, recommandations...). L'environnement, notamment dans le cadre du développement agricole durable, constitue donc un gisement d'emplois sur lequel se porte mon attention.

La vie des entreprises, des administrations, des associations est constamment faite de projets, qui se succèdent, avec, à leur tête, des **chefs de projet** chargés de les mener à bien. C'est une profession également en plein développement, dans le sillage des nouvelles méthodes de gestion et d'organisation. Souvent, ce «métier» s'improvise ou s'acquiert en le pratiquant. La réalisation de ma thèse m'a permis de mettre en œuvre les compétences nécessaires à la gestion de projet, dont les besoins immenses des entreprises, administrations et associations en la matière offrent un créneau fort intéressant pour mon devenir professionnel.

Mes aspirations personnelles, caractérisées par le désir de contribuer à l'avancée et au **développement durable de la région Caribéenne**, pourraient trouver leur épanouissement dans le **développement de l'agriculture** et la **protection de l'environnement** de la zone Caraïbe, qui sont les thématiques auxquelles je suis sensible et dans lesquelles j'aimerais évoluer dans les prochaines années.

Mon profil à la fin de ma formation doctorale est donc celui d'un **chercheur en agronomie** de formation, jouissant d'une **expérience en zone tropicale**, ayant de bonnes connaissances de l'outil informatique, une forte **capacité d'adaptation**, une certaine **aisance relationnelle**, une **grande qualité d'écoute**. Je suis naturellement préparée à vivre dans un **site isolé** et à **encadrer des équipes locales**. **Dynamisme, Leadership et Sens concret** sont mes mots d'ordre.

Ainsi, rattachée à un chef de projet ou à ce poste, je peux mettre en œuvre mes compétences au service du **pilotage, de la coordination et de l'animation de grands projets** en **élaborant les processus et méthodologies** nécessaires à l'établissement des **synthèses, plans d'action, indicateurs, reporting**. Je peux également proposer des **stratégies de développement, négocier des coûts auprès de prestataires, être force de proposition** auprès d'administrateurs pour la mise en place de projets adaptés aux attentes des professionnels.

Réflexion, synthèse et rédaction effectuées entre juillet et septembre 2005 avec l'aide gracieuse de Patrick Labbé (Responsable des ressources humaines de l'INRA centre Antilles Guyane).

Annexe

**BUDGET THESE DE LINE THIEULEUX (en € financé par DOCUP Martinique, BCRD Cirad,
INRA Guadeloupe, Université Antilles-Guyane**

Dotation Docup +BCRD = 43 500	
ANNEE 2002-2003	
Dotation BCRD	3 000.00
Coût Salarial	74 254.00
Coût Thésard	24 000.00
Coût Techniciens	26 670.00
Coût Ouvriers	21 778.00
Coût Intérimaires pendant 15 jours X 2	1 806.00
Fonctionnement	3 294.57
Inscription Université septembre 2002	294.57
fourniture admin, mat expé, etl/fax, reprographie, vêtement, hygiène et sécurité, doc et com, mat info, etc.	3 000.00
Investissement	30 636.59
Centrale d'acquisition de température Campbell achetée	10 778.64
Frais de dédouanement liés	2 162.59
Tensiomètres	6 687
Frais de dédouanement liés	650.25
Facture EURISOTOP envoi 2 urée 15N	3 809.26
Facture EURISOTOP envoi 1 urée 15N	6 548.85
Missions	2 859.64
Participation au 12 eme Workshop en Angleterre du 7 au 13/09/03	2 647.64
Déplacement Guadeloupe debut janvier 2004 Atelier système de culture 19 au 23/01/04	212.00
Divers	95.88
Poster scientifique	95.88
SOUS TOTAL	111 140.68
Part gérée personnellement = 30 732.47	
Année 2003-2004	
Dotation BCRD	5 500.00
Coût Salarial	76 600.00
Coût Thésard	24 000.00
Coût techniciens	29 000.00
Coût ouvriers	23 600.00
Fonctionnement	6 633.28
276 préparations et analyses azote isotope 15	1 900.00
Analyses internes	438.71
Inscription Université septembre 2003	294.57
Coût stagiaire X 3 (2 INRA, 1CIRAD) +	4 000.00
fourniture admin, mat expé, tel/fax, reprographie, vêtement, hygiène et sécurité, doc et com, mat info, etc.	
Investissement	1 000.00
ordinateur portable	1 000.00
Coût Missions	3 791.85
Mission Mme Recous INRA pour 2eme comité de thèse	1 732.05
Mission MR Oliver pour 2eme comité de thèse	1 572.94
Déplacement FDF/PARIS/AVIGNON/FDF 27 AU 31/03	486.86
Formation AVIGNON MODELISATION début avril 2004	499.20
Divers	187.52
Envoi colis fret	187.52
SOUS TOTAL	93 525.13
Part gérée personnellement = 4 979.37	
Année 2004-2005	
DOTATION BCRD	5 000.00
Coût Salarial	24 000.00
Coût Salariée	24 000.00
Fonctionnement	3 400.00
141analyses sol et plante excès 15N Laon Juillet 2005	400.00
Inscription Université septembre 2005	1 300.00
Rédaction rapport de thèse	1 700.00
Investissement	1 590.00
ordinateur portable	1 590.00
Coût Missions	4 105.00
3 missions liaison Martinique-Guadeloupe	2 040.00
PàP/LAON/PàP Novembre 2005	2 065.00
SOUS TOTAL	33 095.00
Part gérée personnellement = 7 505.00	
Dotation BCRD global	13 500.00
GLOBAL	237 760.81