

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION ET CONTEXTE : VERS UNE CULTURE DE LA BANANE PLUS DURABLE	1
A. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE LA CULTURE DE LA BANANE A LA MARTINIQUE	1
B. DES RECHERCHES SONT EN COURS SUR DES NOUVEAUX SYSTEMES DE CULTURE BANANERAIES ENHERBEE.....	1
II. BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE	3
A. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. <i>Généralités sur les systèmes de culture bananiers</i>	3
a) Physiologie du bananier	3
b) Diversité des systèmes de culture bananier :	4
c) La culture de la banane, une culture au fonctionnement spatial hétérogène.....	4
2. <i>Associer une plante de couverture à une culture de vente : intérêts et compétitions</i>	5
a) Intérêts des plantes de couverture :	5
b) Etude de la compétition plante de couverture/Culture de vente :	6
c) Dynamique d'accumulation de la biomasse de la plante de couverture :	7
3. <i>Fonctionnement azoté d'une bananeraie</i> :.....	8
a) Une maîtrise de la fertilisation nécessaire	8
b) Quels indicateurs pour évaluer le statut azoté de la plante ?	8
c) Bilan azoté en bananeraie	12
d) Modification du fonctionnement azoté du système par l'introduction d'une plante de couverture.....	14
4. <i>Modélisation</i>	15
a) Généralités sur les modèles de simulation de culture.....	15
b) SIMBA, un modèle de simulation des systèmes de culture bananiers	15
B. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE	19
III. MATERIELS ET METHODES	22
A. PRESENTATION DU PRAM.....	22
B. ZONE D'ETUDE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL	22
1. <i>Caractéristiques générales du site expérimental</i>	22
2. <i>Dispositifs expérimentaux</i>	23
a) Choix des plantes de couverture.....	24
b) Bananeraie établie en cycle 4	25
c) Nouvelle bananeraie en 1 ^{er} cycle.....	27
C. PROTOCOLES ET PROCEDURES ANALYTIQUES	27
1. <i>Suivi de l'azote dans le sol</i>	28
a) Echantillonnage du sol en bananeraie	28
b) Dosage de l'azote minéral du sol	28
c) Dosage de l'azote et du carbone organique du sol	29
2. <i>Observation du fonctionnement des couverts</i>	29
a) Suivi du fonctionnement de la bananeraie	29
b) Suivi du fonctionnement de la plante de couverture	32
3. <i>Suivis tensiométriques dans la bananeraie</i>	33
4. <i>Mesure de la température dans la bananeraie</i>	34
D. TRAITEMENTS STATISTIQUES	35
E. CONSTRUCTION DU MODELE SIMBA-IC	36
1. <i>Conception du module plante de couverture :</i>	36
2. <i>Spatialisation du fonctionnement azoté de l'interface plante-sol :</i>	38
IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES EXPERIMENTATIONS EN BANANERAIE ENHERBEE	40
A. ETUDE DE LA CONCURRENCE POUR LES RESSOURCES ET EFFET SUR LE DEVELOPPEMENT ET LA CROISSANCE DU BANANIER	40
1. <i>Lorsque la bananeraie est établie (4ème cycle)</i>	40
a) Mise en évidence d'un retard de croissance	40
b) Concurrence pour quelle(s) ressource(s) ?	41
2. <i>Pendant la phase d'installation (1er cycle)</i>	46
a) Mise en évidence d'un déficit de croissance et d'un retard dans le développement	46
b) Concurrence pour quelle(s) ressources ?	48

B. ETUDE SPATIALISEE DU FONCTIONNEMENT AZOTE DE LA BANANERAIE ENHERBEE	52
1. <i>Un fonctionnement de la plante de couverture spatialisé</i>	52
a) En bananeraie en phase d'installation	52
b) En bananeraie établie	53
2. <i>Une dynamique de l'azote dans le sol spatialisée</i>	55
V. APPROCHE DE MODELISATION	56
A. CALIBRATION DU MODELE.....	56
1. <i>Calibration de la croissance en biomasse de la plante de couverture</i>	56
2. <i>LAI de la plante de couverture.....</i>	56
3. <i>Le coefficient d'extinction pour la plante de couverture.....</i>	57
4. <i>Le pourcentage d'azote de la plante de couverture au pied du bananier et dans le grand rang.....</i>	57
5. <i>Le stock d'humus initial</i>	57
6. <i>La minéralisation de la matière organique.....</i>	58
7. <i>Le pourcentage de LAI du bananier et d'exploration des racines dans chacune des zones</i>	59
8. <i>Coefficients de concentration des précipitations dans certaines zones (stemflow et throughflow)....</i>	59
B. VALIDATION DU MODELE	60
C. EXPLORATION PAR LE MODELE DES SCENARIOS DE GESTION DE LA PLANTE DE COUVERTURE ET DE LA FERTILISATION	62
VI. DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....	64
A. DISCUSSION	64
1. <i>Discussion des hypothèses de départ</i>	64
2. <i>Discussion sur le type de plante de couverture à adopter.....</i>	65
3. <i>Discussion sur la gestion du couvert végétal en bananeraie</i>	66
B. LIMITES DE LA METHODOLOGIE ET DES RESULTATS OBTENUS	67
C. LES FREINS MAJEURS AUX CHANGEMENTS DES PRATIQUES CULTURALES	67
D. PERSPECTIVES DE TRAVAIL.....	68
1. <i>Aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée :</i>	68
2. <i>Affiner le choix de la plante de couverture</i>	68
3. <i>Aller plus loin dans la calibration et la validation du modèle</i>	69
4. <i>Evaluation des nouveaux systèmes de culture prototypés par modélisation:.....</i>	69
5. <i>Autres critères à prendre en compte pour la compréhension et la gestion du système de culture bananeraie enherbée :</i>	70
CONCLUSION.....	70
BIBLIOGRAPHIE.....	71
RESUME	83
ABSTRACT	84

Symboles et abréviations

BA	=	Zone au Pied du bananier
CC	=	Cover Crop ou plante de couverture
CIRAD	=	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
DIREN	=	Direction Régionale de l'Environnement
ETP	=	Evapotranspiration potentielle
GR	=	Grand Rang
INN	=	Indice de nutrition azotée
INRA	=	Institut National de Recherche Agronomique
IRD	=	Institut de Recherche et de Développement
LAI	=	Leaf Area Index
MOS	=	Matière Organique du Sol
MAE	=	Mesure Agri-Environnementale
PdC	=	Plante de Couverture
PR	=	Petit rang
PRAM	=	Pôle de Recherche AgroEnvironnemental de la Martinique
SIMBA	=	Simulation bananier
SIMBA-IC	=	Simulation bananier inter crop
SLA	=	Specific Leaf Area
UAG	=	Université Antilles-Guyane
UN	=	Unité d'azote = kg d'azote

I. Introduction et contexte : vers une culture de la banane plus durable

A. *Contexte environnemental de la culture de la banane à la Martinique*

Les exportations de banane dessert représentent une part importante des productions agricoles des pays tropicaux, et notamment des Antilles Françaises : 16 millions de tonnes sont exportées chaque année. Les productions ont longtemps reposé sur la pratique de monocultures intensives sur sol nu utilisant des volumes importants d'intrants et des cultivars à haute productivité afin de maximiser les rendements. Ces modes de production induisent des dégradations des différentes composantes de la fertilité des sols (prolifération du parasitisme tellurique, dégradation de la structure, altération du statut organique) et des impacts environnementaux négatifs importants (pollution de l'eau et de la terre, érosion, diminution de la biodiversité ...).

Dans ce contexte, le développement de systèmes de culture plus durables et la réintroduction de biodiversité dans les systèmes de culture bananiers des Antilles Françaises sont devenus des enjeux majeurs pour tous les pays producteurs de banane. Ainsi, depuis plus d'une décennie, des méthodes de luttes alternatives contre les parasites et ravageurs du bananier font l'objet de recherche. L'adoption des rotations de culture ou jachères combinées à l'utilisation de vitroplants a permis de réduire de plus de 60% l'utilisation de nématicides en Martinique sans baisse de rendements (Chabrier *et al.*, 2005). En alternative aux insecticides comme la chloredécone, désormais interdite mais dont la rémanence dans l'environnement provoque des problèmes de pollution des sols et de dégradation des écosystèmes marins, la lutte biologique et l'utilisation de pièges à phéromone sont désormais privilégiées. La sélection de variétés résistantes est quant à elle développée pour lutter contre des maladies comme la cercosporiose jaune ou noire (champignon qui attaque les feuilles), responsable de perte de rendement et actuellement traitée par épandage de fongicide par voie aérienne.

Quant aux herbicides (diuron, glyphosate, AMPA : métabolite du glyphosate), étant responsables des pics de pollution des cours d'eau en Martinique les plus élevés (DIREN, 2006) et face à la limitation de l'utilisation du glyphosate maintenant fixée à 2kg par an/ha, l'abandon du désherbage total apparaît comme une alternative incontournable.

B. *Des recherches sont en cours sur des nouveaux systèmes de culture bananeraies enherbées*

L'introduction d'un enherbement en bananeraie est une alternative intéressante à l'utilisation d'herbicide puisqu'il assure certaines fonctions de protection de l'agrosystème et de l'environnement en général: protection contre l'érosion, recyclage et transfert d'éléments nutritifs, fixation symbiotique de l'azote atmosphérique dans le cas d'utilisation de légumineuses comme plantes de couverture, régulation des populations d'organismes

indésirables (adventices, nématodes..), augmentation de la biodiversité du sol, amélioration du statut organique du sol...

Dans cette optique, les recherches au CIRAD (Martinique et Guadeloupe) se sont orientées vers la mise en place d'un enherbement des bananeraies à base de graminées ou légumineuses. Les objectifs principaux de ces recherches sont les suivant :

- Acquérir les bases de fonctionnement d'une association bananier/graminée ou légumineuse, dans le but de proposer des modes de gestion compatibles avec une bonne productivité, une réduction des apports d'herbicides et une utilisation rationnelle de la main d'œuvre.
- Promouvoir des systèmes de culture bananiers minimisant les périodes de sol nu pour réduire l'érosion, donc rechercher une couverture rapide après travail du sol (jachères enherbées), et une couverture permanente en bananeraie.
- Trouver des dispositifs de plantation, des mode de gestion de l'implantation des espèces qui rendent compatible le maintien du couvert et l'obtention d'un rendement élevé en banane et une bonne qualité.



Figure 1 Dispositif expérimental en bananeraie enherbée

L'introduction d'un couvert végétal en bananeraie, normalement cultivée sur sol nu, nécessite de maîtriser les incidences réciproques des deux couverts, et en particulier la concurrence vis-à-vis de l'azote. Il est important de comprendre le fonctionnement azoté de ces nouveaux systèmes de culture afin d'aboutir à des recommandations pour la gestion de la fertilisation.

II. Bibliographie et Problématique

A. Synthèse bibliographique

1. Généralités sur les systèmes de culture bananiers

a) Physiologie du bananier

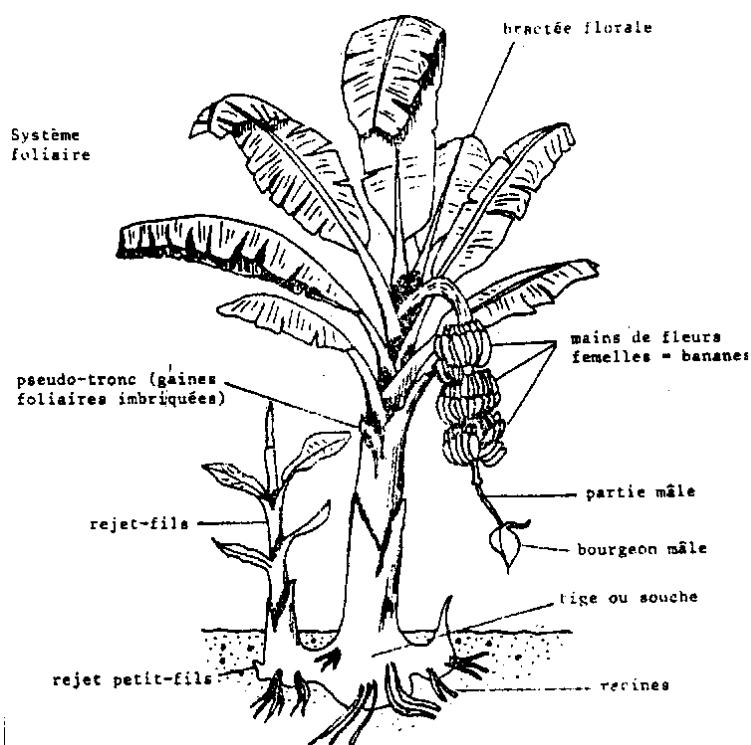


Figure 2. Schéma général d'un bananier en phase de fructification (LASSOUDIERE, 1978)

De la famille des Musaceae, le bananier est une plante herbacée pouvant atteindre 6 à 9 m de haut à la récolte selon les variétés. Son pseudo-tronc (ou stipe) est constitué par l'emboîtement des gaines foliaires. Les larges feuilles du bananier sont érigées verticalement pour les plus récentes et en arches, de cordes horizontales, pour les plus anciennes, pouvant atteindre jusqu'à 3 m de longueur et 1 m de largeur en fin de croissance. Les fleurs femelles émergent du pseudo-tronc six à neuf mois après la plantation, portées par un long axe épais et terminé par la popotte (ou bourgeon mâle). Ces fleurs donnent naissance à des fruits (les doigts) disposés en étages (les mains) pour former un régime de bananes mûres trois mois après la floraison. Le cycle végétatif dure entre 9 mois et un an. Chaque stipe ne peut porter qu'un seul régime ; il est coupé lors de la récolte. Après la récolte du régime, la pousse principale périclite, un rejet latéral présélectionné en amont du pied mère permet le démarrage d'un nouveau cycle de culture. La pérennité du bananier est assuré grâce à ce mode de

reproduction végétatif (les variétés cultivées étant stériles) pendant au moins 5 ans, durant lesquels la population des bananiers croît de plus en plus de façon désynchronisée (Tixier et al. 2004). Le bananier (*Musa acuminata*) de la variété grande naine du groupe des Cavendish est la plus utilisée aux Antilles Françaises (Figure 2).

b) Diversité des systèmes de culture bananier :

A travers le monde, il existe des systèmes de culture bananiers très variés et ayant des fonctions différentes :

- les systèmes de culture vivriers (banane plantain): ce sont en majorité des productions de bananes plantains destinées à l'autoconsommation ou à la consommation locale. Cette production représente 90 millions de tonnes/an et est principalement effectuée en Afrique. Ce sont des systèmes traditionnels peu productifs utilisant peu d'intrants. Ces bananiers sont cultivés en touffe, en association, ou en monoculture extensive, parfois même de manière pérenne.

- les systèmes de culture destinés à l'exportation (banane dessert) : ils représentent une production de 16 millions de tonnes par an de banane dessert, pour 90% à destination de l'Amérique du Nord, de l'Union Européenne et du Japon. Les principaux pays producteurs sont l'Amérique latine, les Philippines ou encore les anciennes colonies Européennes d'Afrique et des Caraïbes. Ce sont encore souvent des systèmes de monocultures intensives utilisant massivement engrais et produits phytosanitaires. Cependant, face à des réglementations de plus en plus strictes concernant l'utilisation des produits phytosanitaires et le respect de « bonnes pratiques agricoles », décidées au niveau public européen ou imposées par la grande distribution, soucieuse de répondre aux exigences nouvelles des consommateurs, ces systèmes de cultures évoluent.

c) La culture de la banane, une culture au fonctionnement spatial hétérogène

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 pseudotrone : stemflow, et des écoulements distribués par égouttage par les débordements du feuillage : throughflow (Cattan *et al.*, 2007).

La **prospection racinaire** du bananier est quant à elle assez **limitée** puisque 90% des racines s'étendent latéralement jusqu'à un mètre de la plante et 70% de la biomasse racinaire totale est confinée dans les 20-40 premiers centimètres du sol (Champion et Sioussaram, 1970 ; cité dans Thieuleux, 2006).

En outre, les **pratiques culturales** accentuent l'hétérogénéité en bananeraie : l'apport d'engrais est souvent localisé au pied du bananier, et les résidus de bananier dans le grand inter rang (pour les dispositifs en double rang).

2. Associer une plante de couverture à une culture de vente : intérêts et compétitions

a) Intérêts des plantes de couverture :

L'association culturale au sens large consiste à faire pousser plusieurs cultures sur une même parcelle. Les avantages attendus d'une telle pratique sont bien souvent une meilleure utilisation des ressources du milieu (Howard et al. 1995). C'est particulièrement le cas lorsque les différentes cultures présentes au champ intéressent l'agriculteur pour leur production. Dans d'autres cas, une ou plusieurs des cultures présentes sont destinées à rendre un « service » à l'agriculteur. Les exemples les plus évidents de ces cultures « de service » sont les plantes de couverture.

Les plantes de couverture présentent des intérêts multiples. Elles assurent une **couverture du sol**, luttant ainsi contre la dégradation des sols, les adventices (par étouffement ou concurrence hydrique/nutritive), l'utilisation massive d'herbicide... Elles contribuent également à certaines améliorations agronomiques et environnementales : apport de matière organique, éventuellement d'azote, augmentation de la biodiversité, diminution du risque de lixiviation de l'azote.

Il existe plusieurs catégories de plantes de couverture. On peut tout d'abord faire une distinction entre les plantes de couvertures utilisées en association avec la culture principale (vergers enherbés, vignes enherbées, bananeraies enherbées...) et les plantes de couverture utilisées en inter culture ou en jachère. Cette deuxième catégorie est notamment représentée par les cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN comme la moutarde, couramment utilisé en France sous climat tempéré) qui comme leur nom l'indique permettent de réduire les fuites de nitrates mais également d'éviter de laisser le sol nu pendant l'inter culture et ainsi limiter l'érosion et le ruissellement. En outre, elles permettent de lutter contre les ravageurs, les maladies et le développement des adventices, laissant ainsi un sol sain et propre pour la culture suivante. En Martinique, Brachiaria decumbens est utilisée comme plante de couverture en jachère (entre deux cultures de banane) pour ses fonctions de couverture : en produisant une biomasse très importante elle limite presque entièrement le développement d'autres adventices, et en particuliers celles hôtes des nématodes du bananier. Cette plante de couverture permet donc un assainissement de la parcelle lors de la jachère. En outre, sa forte couverture du sol limite les risques d'érosion et de ruissellement. Pour finir, l'utilisation d'une graminée en jachère par rapport à une légumineuse est justifiée par sa fonction de piège à nitrates, puisque les résidus des bananiers provenant de la culture précédente apportent une quantité importante d'azote au sol : 70% de la culture est restituée (Godefroy, 1975 ; cité dans Thieuleux, 2006).

Cependant, malgré les avantages évidents que l'introduction d'une plante de couverture en association avec la culture principale présente, celle-ci induit une concurrence pour les ressources du milieu : les nutriments (principalement azote, mais également K, P...), l'eau et la lumière, qui peut s'avérer problématique si elle se fait au détriment des composantes le plus intéressantes pour le producteur : rendement, productivité...

b) Etude de la compétition plante de couverture/Culture de vente :

Les associations culturales au sens stricte concernent la culture simultanée de deux espèces à valeur commerciale direct (vendue) ou indirect (par exemple utilisée comme fourrage). Mesurer la productivité d'une telle association revient à mesurer la productivité des espèces associées par rapport aux espèces cultivées seules. L'indicateur le plus couramment utilisé est le Land Equivalent Ratio (LER) qui compare la productivité des cultures associées et celles des cultures pures, à surface totale égale (Connolly et al., 2001 ; cité dans Carof, 2006). Dans le cadre de notre étude, l'association culturale bananier/ graminée ou légumineuse ne rentre pas dans cette catégorie puisque seule la production des bananiers est souhaitée, la plante de couverture n'assurant qu'un rôle agro-environnemental. L'utilisation de l'indicateur LER ne serait pas pertinente. Mesurer la productivité d'une telle association revient donc à évaluer l'effet sur la productivité (rendement, production de biomasse, statut azoté) de la concurrence entre les bananiers et la plante de couverture.

i Concurrence aérienne pour la lumière :

Pour comparer l'efficience de l'interception lumineuse entre la culture associées et la culture seule, on utilise souvent le concept de Resource Capture Ratio (RCR) (Marshall and Willey, 1983) : il compare la quantité de lumière absorbée par une espèce associée à celle absorbée par l'espèce cultivée seule.

Dans le cas d'une bananeraie enherbée, le bananier est l'espèce dominante (Figure 4). Ce dernier ne subit donc aucune concurrence pour la lumière, à l'exception des 1^{ers} mois du 1^{er} cycle où les vitroplants tout juste plantés peuvent se trouver légèrement ombragé par la plante de couverture (Figure 3).



Figure 3 Bananeraie enherbée en 1er cycle



Figure 4 Bananeraie enherbée en 4ème cycle

ii Concurrence pour les ressources du sol : azote et eau

Lorsque l'on introduit une plante de couverture dans un système de culture bananier habituellement sur sol nu, le bilan hydrique s'en trouve fortement modifié. Tout d'abord, associer une autre culture en bananeraie permet d'augmenter le taux de couverture du sol, comme c'est le cas également dans les systèmes agroforestiers. Ceci a notamment pour conséquence de diminuer fortement l'évaporation du sol (Kinama et al. 2005, cité dans Celette, 2007). En outre, l'enherbement contribue à réduire le ruissellement et l'érosion (Battany et Grismer 2000). Cependant, certaines zones peuvent se trouver asséchées, comme c'est le cas de l'inter rang en vigne enherbée (Celette, 2007). Cet assèchement induit par conséquent une concurrence hydrique généralement plus importante.

Il y a très peu de publications existantes sur l'association bananeraie/plante de couverture, en particulier sur l'effet concurrence pour l'azote de la plante de couverture. Silva (2002) a montré qu'il y avait un retard de croissance des bananiers lorsqu'un couvert de Canavalia est implanté 2 mois avant la plantation des vitroplants. Lorsque les deux couverts sont implantés en même temps, on n'observe pas ce retard de développement. Cependant, Canavalia étant une légumieuse, on peut penser que la compétition pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier est moins importante que lorsqu'une graminée est implantée.

D'après les résultats obtenus sur les trois premiers cycles en bananeraie enherbée sur la station Rivière lézarde, il semble qu'en phase d'installation on observe un retard de croissance des bananiers, témoignant d'une compétition azotée. En revanche, lorsque la bananeraie est installée, il semble qu'un équilibre se soit installé et que la compétition soit acceptable (R.Achard, communication personnelle).

iii Autres effets néfastes de la plante de couverture

Certaines plantes de couverture présentent un potentiel allélopathique fort, ce qui permet de lutter contre le développement des adventices. C'est le cas de Neonotonia wightii sur une plante particulièrement sensible, le cresson alénois (Damas et al., 2007). Cependant, cet effet allélopathique ne doit pas affecter le bananier sous peine de baisse de la productivité. Peu de données sont disponibles sur les effets allélopathiques des différentes espèces utilisable comme plantes de couverture sur la croissance du bananier.

c) Dynamique d'accumulation de la biomasse de la plante de couverture :

Après une défoliation quasi-totale (une fauche par exemple), l'accumulation de biomasse par un peuplement de graminées suit en général une courbe d'allure sigmoïde – appelée également courbe logistique - et dont l'allure générale est caractéristique de l'espèce. La croissance se caractérise par une phase initiale exponentielle d'accélération de croissance, qui correspond à la reconstitution de l'appareil foliaire, suivi d'une phase linéaire, pendant laquelle l'élongation des organes est maximale et enfin d'une phase d'amortissement qui détermine la biomasse maximale accumulée par le peuplement. La vitesse maximale de croissance, représentée par la pente de la phase linéaire, est peu variable d'une espèce à l'autre. Il s'agit d'un phénomène général, également constaté en milieu tempéré. En revanche,

les différences entre espèces sont beaucoup plus importantes dans la phase initiale exponentielle et dans la phase finale d'amortissement, qui représentent respectivement **la rapidité avec laquelle les plantes reconstituent leur appareil foliaire**, et leur **capacité à accumuler la matière sèche produite**. (Roberge et Toutain, 2004).

Conclusion sur l'intérêt des bananeraies enherbées :

La présence d'un couvert végétal vivant en bananeraie semble donc présenter de nombreux intérêts écologiques, environnementaux, agronomiques, à condition de bien maîtriser les concurrences que la présence de ce couvert induit pour les ressources du sol (principalement eau et azote). Nous allons par la suite nous concentrer sur l'étude de la compétition azotée entre bananier et plante de couverture.

3. Fonctionnement azoté d'une bananeraie:

a) Une maîtrise de la fertilisation nécessaire

L'azote est un élément essentiel de la biomasse végétale. Son rôle est primordial dans la constitution des protéines et des chloroplastes. Cependant, même si l'azote existe sous trois formes dans la biosphère (organique, minérale et gazeuse), c'est principalement la forme minérale soluble qui est consommée par les végétaux. Il est d'ailleurs l'élément minéral le plus consommé par les plantes dans le sol. Les formes ammoniacales (NH_4^+) et nitriques (NO_3^-) sont celles participant à l'alimentation des végétaux.

Dans le contexte actuel où l'agriculture doit produire de façon durable et où le coût des intrants augmente, la maîtrise de l'alimentation azotée du peuplement végétal revêt une importance primordiale. En effet, la quantité d'azote disponible pour la culture au cours de son cycle a un effet direct sur le rendement et la qualité de la production agricole. Ceci est d'autant plus vrai pour le bananier qui ne possède pas d'organe réserve (Lassoudière, 2007). En outre, la maîtrise de la teneur en nitrates des eaux d'infiltration est une préoccupation environnementale majeure, puisque la réglementation établit à 50 mg/L la teneur maximale autorisée dans l'eau potable. Cette maîtrise est importante pour la protection des écosystèmes marins des Antilles, et notamment des récifs coralliens, particulièrement affectés par l'eutrophisation des eaux.

b) Quels indicateurs pour évaluer le statut azoté de la plante ?

Il existe plusieurs méthodes de diagnostic du statut nutritionnel des cultures en vue de préconiser une fertilisation azotée adaptée. Deux catégories de méthodes peuvent être distinguées : celles basées sur des indicateurs sol et celles basées sur des indicateurs de la nutrition azotée de la plante.

i Méthode du bilan azoté

Parmi les méthodes basées sur des indicateurs sols, la méthode du bilan azoté recourt à des analyses de l'azote biodisponible pour les plantes et de l'azote potentiellement minéralisable. Des logiciels comme AZOBIL (Machet, 1990) et plus récemment AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999) sont des applications fondées sur la méthode du bilan azotée, et sont fréquemment utilisés pour le pilotage de la fertilisation en climat tempéré.

De manière générale, le bilan azoté peut s'écrire de la manière suivante :

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

Où Pi est la quantité d'azote accumulée dans le peuplement à l'ouverture du bilan

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

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

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

M'n, la minéralisation nette du sol en l'absence d'apport d'engrais

L, le lessivage

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

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

Gx, les pertes gazeuses liées à l'apport X

Bien souvent, certains de ces flux sont très faibles ou difficiles à estimer. Il n'est donc pas rare de les négliger. De plus, d'autres flux peuvent encore être pris en compte comme la fixation de l'azote atmosphérique (avec la présence d'une légumineuse ou la fixation symbiotique libre) ou encore les apports atmosphériques. Nous allons plus loin détailler les termes du bilan azoté dans le cas particulier d'un système de culture bananier.

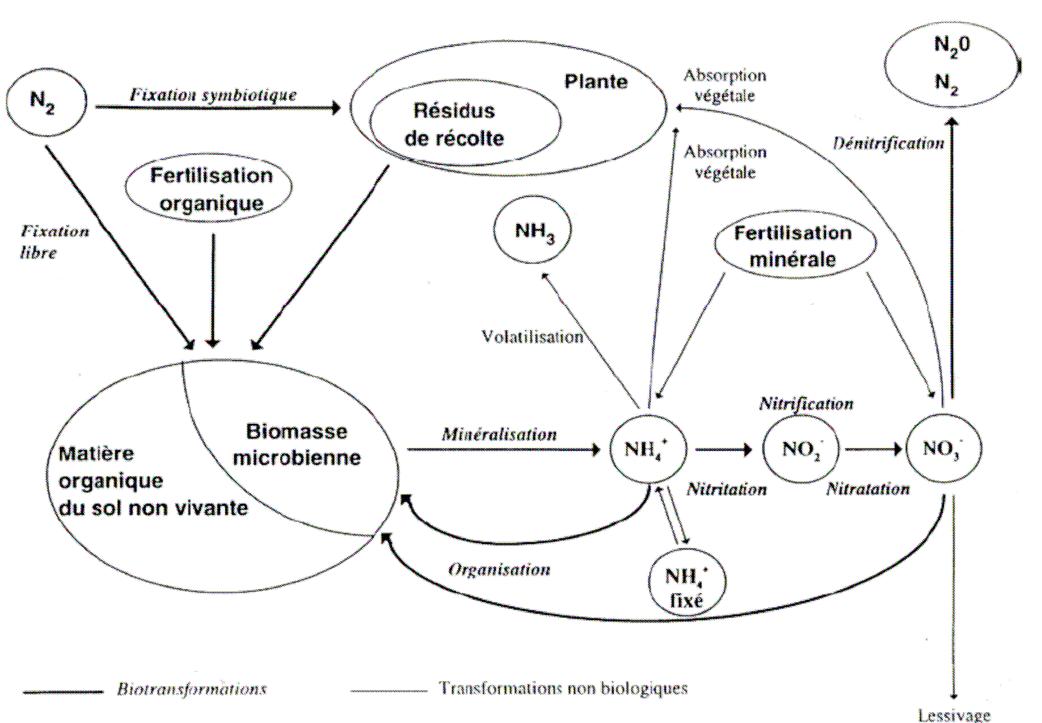


Figure 5 Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans le sol (d'après Nicolardot et al., 1997)

ii indicateur plante

Afin de déterminer le statut azoté d'une culture, on utilise fréquemment l'indice de nutrition azoté (INN), qui correspond à la teneur en azote réelle de la plante divisée par la teneur en azote optimale.

L'azote, du fait de son cycle biologique et des apports de fertilisation en agriculture est le nutriment dont la disponibilité dans le sol varie le plus à court terme, ce qui explique en partie la grande variabilité de sa concentration dans la biomasse végétale. Cependant, Lemaire et Gastal (1997) ont montré que même en situation de forte disponibilité en azote minéral dans le sol, la concentration en azote de la biomasse d'un peuplement végétal diminuait au cours de sa croissance du fait d'une accumulation relative plus importante du carbone vis-à-vis de l'azote ce qui conduit à la « dilution » de l'azote dans la plante au cours de sa croissance. Cet **effet de dilution** a été mis en évidence sur un grand nombre d'espèces et une formulation générale a pu être proposée :

$$N\% = a (W) - b$$

Avec N% : teneur en azote de la biomasse aérienne du peuplement

W : biomasse en T/ha

a : teneur en azote pour W= 1

b : coefficient sans dimension (Doré et al., 2006)

En condition de fourniture d'azote non limitante, la courbe de dilution du bananier en cycle 4 est proche de la courbe critique des plantes en C3 (Figure 6). En revanche, en 1er cycle, la courbe maximale de dilution obtenue est bien au dessous de la courbe critique des plantes en C3 en raison des faibles teneurs en azote des plantes issues de cultures cellulaires (Thieuleux, 2006). Cependant, une bananeraie en premier cycle ne peut être considérée comme un peuplement végétal au couvert fermé, et par conséquent, la courbe de dilution de l'azote ne peut s'appliquer.

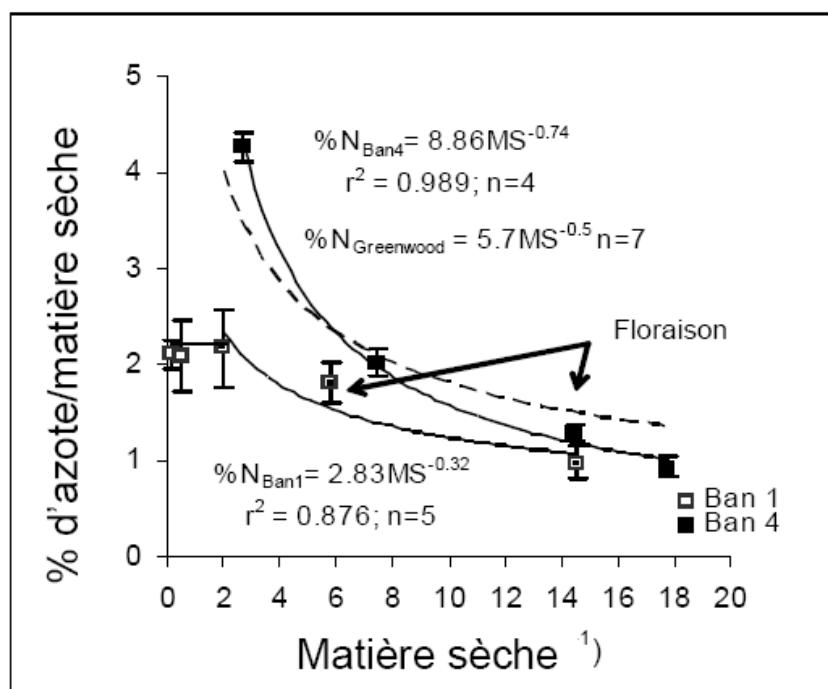


Figure 6 Courbe de dilution du bananier en cycle 1 et en cycle 4, comparées à la courbe de dilution des plantes en C3 de Greenwood et al. (1990), Thieuleux (2006) ; MS en T/ha

Mesurer la teneur en azote réelle du bananier nécessitant des mesures lourdes et destructives, des méthodes alternatives tel que le Hydro-N Tester ou le SPAD peuvent être utilisées. Ce sont des chlorophylle-mètres dont les mesures sont basées sur la transmittance de la feuille. Il est apparu dans une expérimentation antérieure que la valeur moyenne du SPAD était proportionnelle à la teneur en azote de la feuille II et constituait ainsi un indicateur de suivi du niveau de nutrition du bananier en azote, Figure 7(Achard, 2006). Ces indicateurs ont l'avantage d'être rapides et simples d'utilisation. Ils nécessitent cependant de faire des approximations quant à la teneur en azote totale du bananier : une relation entre la teneur en azote total du bananier et la teneur en azote de la feuille II a été observée sur des essais effectués par le CIRAD, Figure 8 (Achard, communication personnelle).

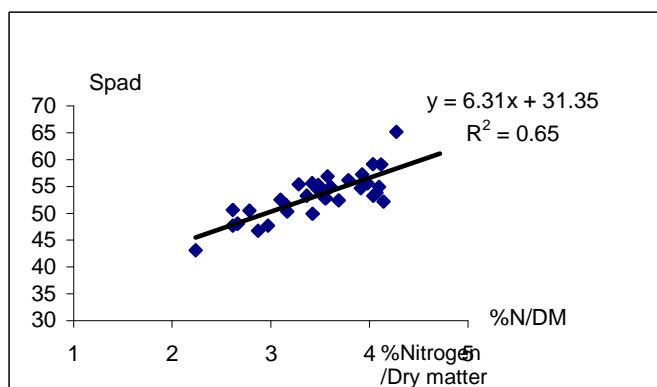


Figure 7 Relation entre SPAD et la teneur en azote de la feuille II

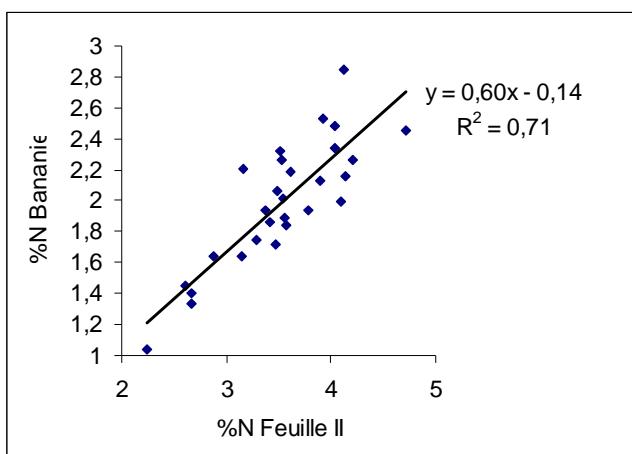


Figure 8 Relation entre teneur en N du bananier et teneur en N de la feuille II

La teneur en azote ($\%N_{réel}$) est comparée à la teneur optimale ($\%N_{optimal}$) obtenue par la courbe de dilution. L'INN est ainsi défini comme le rapport ($\%N_{réel}$) / ($\%N_{optimal}$).

c) Bilan azoté en bananeraie

i Absorption des cultures :

Les besoins de la culture de banane sont estimés à 200 kg N/ha/an. L'absorption d'azote chez le bananier est strictement proportionnel à ces besoins en croissance durant le cycle puisque le bulbe ou souche ne contient jamais plus de 15% de l'azote du bananier et n'a ainsi pas de rôle de réserve, (Martin-Prével et Montagut, 1966 ; cité dans Thieuleux, 2006). La prospection racinaire du bananier est assez limitée puisque 90% des racines s'étendent latéralement jusqu'à un mètre de la plante et 70% de la biomasse racinaire totale est confinée dans les 20-40 premiers centimètres du sol (Champion et Sioussaram, 1970 ; cité dans Thieuleux, 2006). 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, mais défavorable à l'absorption des nitrates lessivés à plus de 60 cm.

D'après Thieuleux (2006), l'efficacité de l'engrais est faible pour la culture de la banane : de 20 à 35% en fonction du stade de développement. En effet les pertes d'azote par lessivage sont très importantes en zone tropicale. En outre, une part importante de cet engrais, estimée à 40 % est organisée par la biomasse microbienne.

ii Minéralisation de la matière organique du sol :

La minéralisation nette de l'azote est la transformation de l'azote organique endogène du sol en azote minéral. Dans des conditions de pH très faible et de température élevées, cette transformation peut-être d'origine physico-chimique, ce qui est le cas aux Antilles. Sous climat tempéré, elle est principalement due à la dégradation biologique par les micro et macro-organismes du sol. Dans les sols tropicaux, les quantités d'azote minéralisées annuellement peuvent varier de quelques dizaines à plus de 150 kg/ha (Bonzi, 2002).

En milieu tempéré, la phase de nitrification, souvent très rapide, justifie que l'on puisse regrouper les mécanismes de minéralisation et de nitrification. On considère ainsi que l'azote minéral disponible pour la plante est sous forme nitrique. Ce n'est pas le cas dans les zones tropicales, les sols étant acide (en particulier les sols brun rouille à halloysite où les essais sont effectués, où le pH est égal à 5,5), la nitrification est ralentie et doit donc être prise en compte (Sierra *et al.*, 2003).

iii Organisation microbienne :

L'organisation microbienne correspond à l'assimilation de l'azote minéral par les micro-organismes du sol pendant l'oxydation de substrats carbonés. Ce phénomène est aussi appelé immobilisation car les plantes étant moins bonnes compétitrices que les micro-organismes pour l'azote minéral, elles ne peuvent accéder à l'azote incorporé dans la biomasse microbienne (Hart *et al.*, 1994a, cité dans Vale, 2006)

Bien que temporaire (l'azote immobilisé est par la suite re-minéralisé lors du renouvellement de la biomasse microbienne du sol), l'organisation microbienne représente un poste important de pertes d'azote biodisponible pour la culture en place.

Récemment, il a été montré qu'en bananeraie, si une part importante de l'engrais azoté n'est pas absorbée à court terme par la culture, le reste n'est pas majoritairement lessivé. En effet, environ 40 % sont réorganisés par la biologie du sol et susceptibles d'être à nouveau disponibles pour les plantes (Thieuleux, 2006).

iv Minéralisation des résidus de culture (bananier) :

Les besoins de la culture de banane sont estimés à 200 kg N/ha/an. Or les exportations, qui correspondent aux régimes récoltés, ne représentent que 60 kg N/ha/an, soit 30% de l'azote total de la plante, les 70% restant étant restitués au sol sous forme de résidus (Godefroy, 1975).

v Lixiviation :

L'écoulement d'eau est concentré à la base du tronc et au milieu de l'inter rang du fait de la structure du couvert bananier. De ce fait 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 où sont apportés les engrais (Bussière et al., journal of hydrology, soumis, cité dans Thieuleux, 2006). Ce fonctionnement hydrologique distribué peut aggraver les pertes d'azote par ruissellement et lixiviation.

vi Ruissellement :

Les travaux de Line Thieuleux montrent que les pertes en eaux par drainage représentent quasiment la totalité des pertes en eaux des bananeraies alors que le ruissellement ne représente que 4 à 8% de ces pertes sans ETP. On peut donc estimer que le ruissellement est négligeable en bananeraie.

vii Volatilisation :

Quant aux pertes par volatilisation de l'azote ammoniacal, elles sont liées aux conditions du sol (pH, CEC, porosité), à son humidité (concentration de la solution du sol), et aux conditions climatiques et peuvent varier entre quelques % et 50 % pour les engrais minéraux. Pour les sols tropicaux acides, ces pertes sont faibles, en raison de l'humidité du sol qui induit un transfert rapide de l'azote dans le profil et du faible pH du sol qui n'est pas favorable à ce processus. Par ailleurs, pour un taux d'argile supérieur à 60%, une CEC supérieure à 5 cmol/kg et un pourcentage de matière organique du sol supérieure à 1.5, conditions réunies pour les parcelles étudiées (sol brun rouille à halloycite), les pertes par volatilisation sont très faibles (Bonzi, 2002, citée dans Thieuleux, 2006). On pourra donc, dans nos conditions expérimentales, les négliger.

d) Modification du fonctionnement azoté du système par l'introduction d'une plante de couverture

En premier lieu, la plante de couverture consomme l'azote minéral situé dans la zone du sol explorée par son système racinaire, réduisant ainsi les ressources disponibles pour le bananier. En outre, la présence d'une plante de couverture dans un vignoble permet de réduire le ruissellement (Battany et al., 2000), réduisant ainsi les pertes d'azote par ruissellement. Cependant, nous avons vu que les pertes par ruissellement ne représentaient que 4% des pertes totales. En revanche, la plante de couverture pourrait jouer un rôle de piège à nitrates et ainsi diminuer les pertes d'azote par lessivage très importantes en bananeraie pendant la saison humide (hivernage).

4. Modélisation

a) Généralités sur les modèles de simulation de culture

Les modèles de culture et de systèmes de culture développés durant les 25 dernières années ont beaucoup évolué. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques ou physiologiques (production de biomasse, rendements...), parfois les impacts environnementaux et les performances économiques de ces systèmes (Tixier, 2004).

Leurs intérêts sont multiples : ils peuvent être utilisés afin d'étudier l'effet de pratiques agricoles sur les rendements, la qualité de la production, l'environnement. Ils peuvent également être utilisés en conseil technique afin d'aider l'agriculteur à prendre des décisions en matière d'irrigation, de choix de variété, de date de semis ou de raisonnement de la fertilisation azotée...

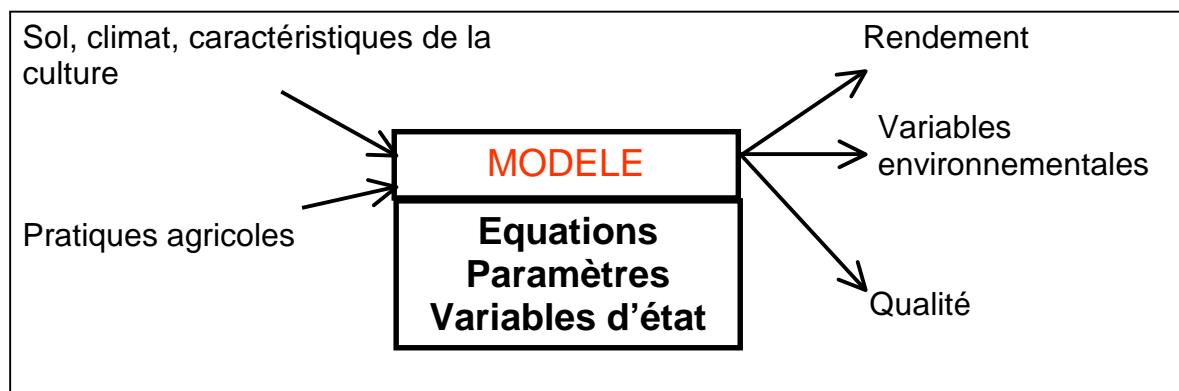


Figure 9 Fonctionnement général d'un modèle de simulation de culture (cours AgroParisTech, Makowski)

b) SIMBA, un modèle de simulation des systèmes de culture bananiers

Bien que le modèle STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard, Brisson et al., 1998) ait été partiellement paramétré pour le bananier aux Antilles (Brisson et al., 1998), il ne permet de simuler qu'un seul cycle de culture de banane (lorsque la croissance est encore homogène) et considère une plante moyenne ce qui n'est pas satisfaisant pour l'étude de cette culture où le peuplement devient hétérogène après plusieurs cycles. Ainsi, le modèle SIMBA (Simulation bananier) a été développé (Tixier et al., 2004) et permet de simuler la croissance et le développement d'une bananeraie sur le long terme en prenant en compte la désynchronisation du peuplement.

Par la suite, le modèle SIMBA-N (Dorel *et al.*, 2008) a été créé pour simuler la dynamique de l'azote en bananeraie, et ce sur plusieurs cycles, dans une optique d'aide à la gestion de la fertilisation. Il est basé sur le calcul hebdomadaire du bilan azoté :

$$\text{MINSOIL}_t = \text{MINSOIL}_{t-1} + F_t + S_t + M_t - U_t - L_t$$

La croissance du bananier est simulée selon un formalisme classique, basé sur **l'interception du rayonnement** pour la production de biomasse et la répartition des assimilas. Quant au **développement du bananier**, il est basé sur le concept de la **somme des températures**. Voir Annexe 5.

Stocks

MINSOIL _t	N minéral du sol au temps t
SON _t	N organique du sol au temps t
BAN _t	N des bananiers au temps t
RESt	N des résidus de culture au temps t
R _{i,t}	N minéral des résidus de culture âgés de i semaines au temps t

Flux

F _t	N minéral apporté par fertilisation au temps t
L _t	N minéral lessivé au temps t
U _t	N minéral prélevé par le bananier au temps t
E _t	N minéral exporté (régimes) au temps t
M _t	N minéralisé provenant des résidus au temps t
S _t	N minéralisé provenant de la matière organique du sol au temps t
H _t	N humifié provenant des résidus au temps t

Figure 10 Variables du modèle SIMBA-N (en kgN/ha)

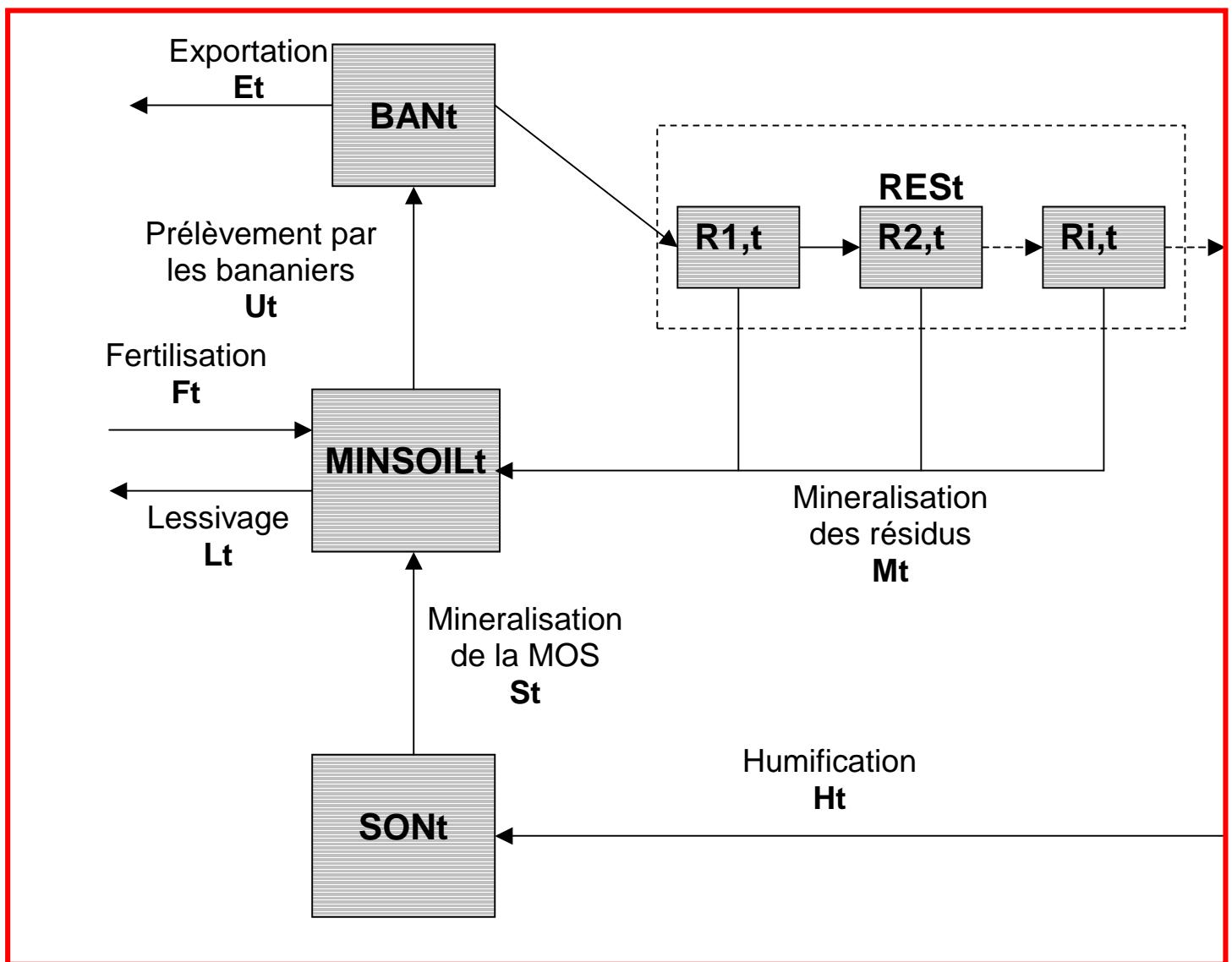


Figure 11 Architecture du modèle SIMBA-N

Lt : N minéral lessivé au temps t

L'azote minéral lessivé est calculé au pas de temps hebdomadaire avec l'équation du modèle NLEAP (Shaffer et al., 1994) :

$$L_t = \text{MINSOIL}_t \cdot (1 - \exp(-K_{\text{lea}} \cdot (R_t - ETP_t) / RU_{\text{max}}))$$

Avec:

R_t = Pluviométrie au temps t (mm)

ETP_t = Evapo-Transpiration Potentielle (mm)

RU_{max} = Reserve Utile Maximale (mm)

K_{lea} = coefficient de lessivage dépendant des caractéristiques physiques du sol.

Ut : N minéral prélevé par le bananier au temps t

La teneur en azote du bananier (N_t) est calculée en fonction de la quantité de matière sèche produite (MS_t), selon la courbe critique de dilution des plantes en C3 (Greenwood et al., 1990).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } MS_t < 2 \text{ (T/ha)} \\ \text{Alors } N_t = 4 \% \\ \text{Sinon } N_t = 5.7 MS_t^{-0.5} \end{array} \right.$$

Mt : N minéralisé provenant des résidus de culture au temps t

Une fraction résiduelle K_1 (coefficient iso-humique) des résidus de culture reste sous forme organique et est transférée au stock d'azote organique du sol (SONt). L'autre fraction est directement minéralisée. Selon Thieuleux (2006), le taux de minéralisation (M_i) de cette fraction varie avec le temps selon une fonction exponentielle décroissante :

$$M_i = \exp(K_{\text{deg1}} + K_{\text{deg2}} \cdot i)$$

Où i est le nombre de semaines après la restitution des résidus et K_{deg1} et K_{deg2} sont deux paramètres caractérisant la dynamique de la minéralisation de l'azote organique, respectivement égal à 3.2 et -0.19 pour les résidus de bananier.

St : N minéralisé provenant de la matière organique du sol au temps t

La minéralisation de la matière organique du sol produit chaque semaine une quantité d'azote minéral calculée selon l'équation suivante :

$$S_t = K_{\text{som1}} \cdot SONt + K_{\text{som2}}$$

Où K_{som1} et K_{som2} sont deux paramètres dépendant des caractéristiques du sol

Ce point bibliographique va ainsi nous permettre de définir clairement les hypothèses de travail ainsi que les objectifs du stage, mais également la méthodologie appliquée pour atteindre ces objectifs.

B. Définition de la problématique

L'introduction d'une plante de couverture en bananeraie modifie sa structure. Cependant, on distingue deux situations différentes :

- En **bananeraie établie**, la plante de couverture se situe dans le grand rang, dans la zone de transition et au pied du bananier. Le petit rang est quant lui couvert par un paillis des résidus de bananiers qui empêche la plante de couverture de s'y développer, Figure 12.
- En **bananeraie en phase d'installation (1^{er} cycle)**, il n'y a pas encore de résidus de bananiers dans le petit rang, la plante de couverture est située dans le grand rang, le petit rang, et au pied du bananier.

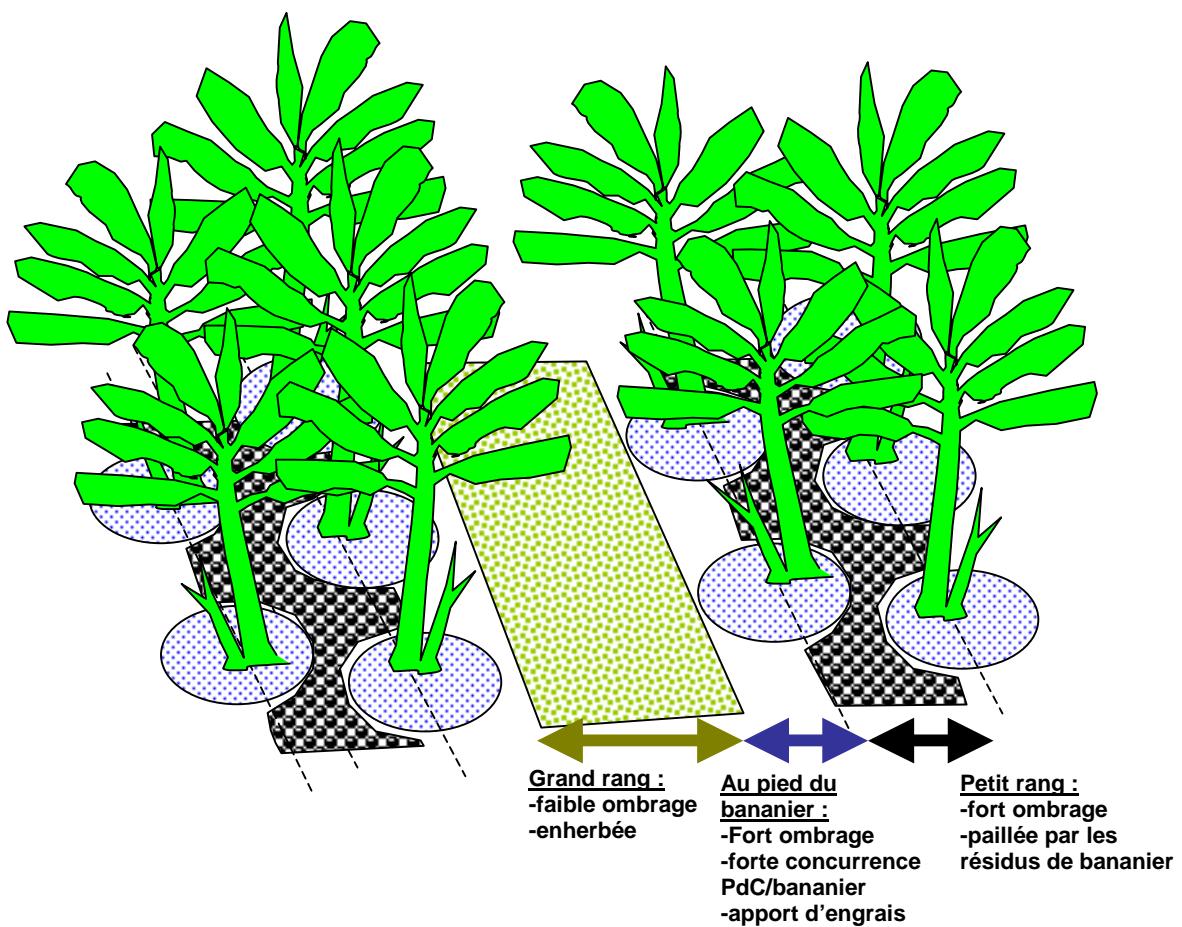


Figure 12 Schéma représentant l'hétérogénéité spatiale en bananeraie enherbée (à partir du 2^{ème} cycle)

- ❖ Dans un premier temps, nous allons essayer d'identifier quel est **l'impact de l'implantation d'une couverture végétale vivante sur la croissance et le développement de la bananeraie**. Si une concurrence existe, à quelle période du développement a-t-elle lieu ?
 A quoi est-elle due ? (i) une ressource limitante: eau, lumière, azote, autres éléments minéraux, température ? (ii) Un effet allélopathique ?
 Cette concurrence est-elle différente suivant la plante de couverture implantée ? Comment minimiser les effets de cette concurrence ?
 Pour répondre à ces questions, nous avons choisi de caractériser la croissance et le fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée en considérant deux situations initiales : une bananeraie établie en cycle 4 et une bananeraie en phase d'installation.
- ❖ Comme nous l'avons remarqué dans la partie bibliographique, une bananeraie sur sol nu présente des hétérogénéités spatiales importantes. D'après la Figure 12, on peut supposer que **l'introduction d'une plante de couverture augmentera cette hétérogénéité spatiale**. Pour tester cette hypothèse, nous nous proposons d'une part de mesurer la dynamique de l'azote dans différents compartiments et d'autre part de caractériser la croissance de la plante de couverture en différentes zones.
- ❖ Dans un second temps, nous allons essayer de **modéliser le fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée** en utilisant les données expérimentales obtenues. Pour répondre à cet objectif, il est nécessaire d'adapter le modèle pré-existant SIMBA-N, d'une part en introduisant un module de croissance de la plante de couverture, et d'autre part en spatialisant le fonctionnement azoté de l'agrosystème.
 Le modèle ainsi construit, **SIMBA-IC** (Simulation bananier inter crop) peut-il ensuite être utilisé pour le prototypage de systèmes de culture bananeraie enherbée ?

Le point bibliographique que nous venons de réaliser ainsi que les premiers résultats obtenus par le CIRAD nous permettent d'émettre les hypothèses de travail suivantes :

Définition des hypothèses de travail :

Hypothèse 1 : *Il existe une concurrence pour l'azote entre la plante de couverture et la bananeraie en phase d'installation. En bananeraie établie, en condition de fertilisation non limitante et de coupes régulières, la concurrence du couvert de graminée est tolérable.*

Hypothèse 2 : *la structure du couvert ainsi que le dispositif de plantation induit une hétérogénéité spatiale en bananeraie, accentuée par l'introduction d'une plante de couverture.*

Afin de confirmer ou infirmer les hypothèses émises, les objectifs assignés de mon stage étaient les suivants :

Objectifs :

- ❖ Analyse spatialisée du fonctionnement azoté des couverts végétaux bananier et plante de couverture.
- ❖ Etude de l'effet de la compétition azotée entre la bananeraie et la plante de couverture (en phase d'installation et en bananeraie établie) sur le développement et la croissance du bananier.
- ❖ Elaboration du modèle de fonctionnement azoté de cet agrosystème en partant du modèle pré existant SIMBA-N (sur plateforme STELLA).
- ❖ Paramétrisation du modèle avec les données mesurées sur la bananeraie établie et sur la bananeraie en phase d'installation.
- ❖ Exploration par le modèle de la gestion de la fertilisation en bananeraie enherbée pour aboutir à des applications transférables aux producteurs.

Ces objectifs mis en place, nous allons maintenant décrire la démarche utilisée pour les atteindre.

III. Matériels et méthodes

A. Présentation du PRAM

Le PRAM est le pôle de recherche Agro-environnemental de la Martinique. Ce Pôle, situé sur la commune du Lamentin, à Petit Morne, regroupe les moyens humains et techniques du Cirad, du Cemagref, de l'INRA et de l'IRD. La mission de cet outil de recherche pour le développement est de concevoir une agriculture moderne, diversifiée, durable et reproductible, en préservant l'environnement et en assurant aux exploitants des revenus convenables.



B. Zone d'étude et dispositif expérimental

1. Caractéristiques générales du site expérimental

Toutes les expérimentations ont été effectuées sur les parcelles expérimentales du CIRAD situées à la station de Rivière Lézarde (Figure 13), au centre de la Martinique sur sol brun rouille à halloysite (ou nitisol en classification FAO). Ce sont des sols apparentés aux sols peu évolués à allophane. Ces deux types de sols sont issus de projections volcaniques de cendres ou pences perméables. Les sols à allophanes 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 argile 1/1 (halloycite ou kaolinite hydratée) par une alternance de cycle humectation-dessication et permet la formation des sols bruns rouilles à halloysite. La station de Rivière Lézarde possède 2 ha en expérimentation banane.

La pluviosité moyenne annuelle 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, appelée Carême, s'étend de janvier à juin avec une pluviosité mensuelle variant de 96 à 198 mm et des températures moyennes mensuelles comprises entre 24 et 26 °C. En cette saison, la bananeraie est en déficit hydrique, une irrigation est alors pratiquée. La saison humide, ou hivernage, s'étend de juillet à décembre avec une pluviosité mensuelle de 232 à 328 mm et des températures moyennes mensuelles de 26 °C. Cette saison humide est particulièrement propice au lessivage de l'azote.

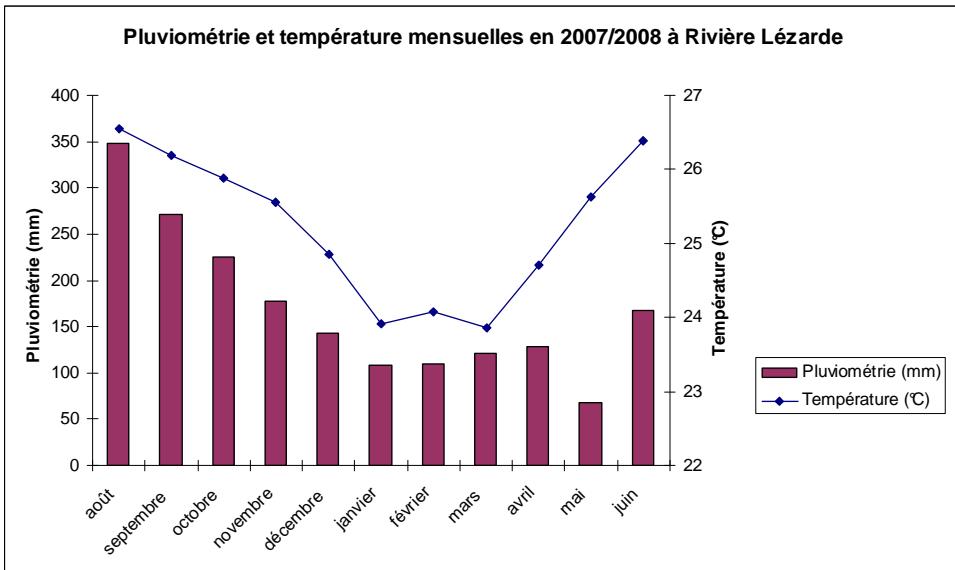


Figure 14 Pluviométrie et température mensuelles août 2007- juin 2008 sur la station Rivière Lézarde.
Source Cirad-PRAM

2. Dispositifs expérimentaux



Figure 15 Dispositif expérimental à Rivière Lézarde: comparaison bananeraie sur sol nu et enherbée

Afin d'étudier l'influence de l'introduction d'un couvert végétal en bananeraie, les expérimentations ont été établies autour de deux dispositifs complémentaires :

- En bananeraie établie avec couvertures de graminées et témoin sol nu (en 4^{ème} cycle)
- Durant la phase d'installation de la bananeraie sur différentes couvertures vivantes et sur sol nu.

Les parcelles sont irriguées sur frondaison durant la saison sèche.

a) Choix des plantes de couverture

Le coût de la main d'œuvre étant très élevé à la Martinique (droit du travail français), il est nécessaire d'opter pour un couvert végétal qui autorise un entretien mécanisé et qui rende possible la circulation d'engins pour interventions culturales (engrais, gainage, récolte...). Suite à des discussions préliminaires avec la profession sur l'acceptabilité de bananeraie avec couverture vivante, le choix d'un couvert de **graminées** qui se prête bien au fauchage et au roulage a été retenu en priorité pour les études expérimentales. Parallèlement, en Guadeloupe, la mécanisation étant moins importante et les bananeraies plus majoritairement sur pente, des expérimentations sur l'utilisation de **légumineuses** rampantes ont été réalisées. Les résultats obtenus par le CIRAD Guadeloupe (Marc Dorel, communications personnelles) semblent indiquer que pour ce type de couvert un entretien mécanisé à l'aide d'un gyrobroyeur d'un couvert de légumineuse en bananeraie serait aussi envisageable. En outre, l'utilisation d'une légumineuse comme plante de couverture est en théorie intéressante puisqu'en fixant l'azote atmosphérique, elle n'entre pas en compétition avec le bananier pour les ressources en azote minéral du sol. En pratique, lorsque l'offre en azote minérale du sol est trop importante (ce qui est notamment le cas dans la zone de fertilisation au pied du bananier), la légumineuse ne fixe pas l'azote de l'air. En effet, la mise en place de la fixation est inhibée par les fortes teneurs en azote minéral dans la zone de présence des nodosités.

Afin de limiter la compétition pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier, il est nécessaire d'opter pour une espèce qui ne produit pas trop de **biomasse**. Elle doit néanmoins présenter une **couverture du sol** suffisante pour ne pas être envahie par d'autres espèces. En outre elle doit être suffisamment tolérante pour **résister à l'ombrage** d'une bananeraie établie. Afin de limiter l'infestation des bananier par les nématodes, il est préférable de choisir une plante de couverture non **hôte de Radopholus similis**, principal nématode du bananier. Pour finir, afin de rendre possible la mise en place de l'enherbement chez les planteurs, l'espèce sélectionnée doit être **disponible** et donc son importation doit être autorisée. D'autres critères comme **l'effet allélopathique** doivent être pris en compte mais ne sont pas encore connus à l'heure actuelle et devront être testés dans un futur proche.

Par conséquent, pour les études expérimentales, nous avons choisi de suivre le fonctionnement de bananeraies avec quatre types d'enherbement, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1:

- Trois espèces de graminées : Brachiaria decumbens, qui à l'avantage d'être déjà utilisée en jachère; Cynodon dactylon et Paspalum notatum
- Une légumineuse : Neonotonia wigtii, déjà étudiée au CIRAD de Guadeloupe, et dont les premiers résultats semblent prometteurs

	Biomasse (=compétition pour l'azote)	Couverture du sol	Résistance à l'ombrage	Compétition hydrique	Hôte de nématode (Radopholus Similis)	Disponibilité sur le marché Antillais	Effet allélopathique
Brachiaria decumbens	++	++	--	+	-	+	?
Cynodon dactylon	+	+	-	+	-	+	?
Paspalum notatum	+	+	+	+	-	+	?
Neonotonia wightii	+	+	-	-	-	?*	?

Tableau 1 Caractéristiques des plantes de couverture choisies pour les expérimentations

* importée à titre expérimental en Martinique. À l'heure actuelle l'autorisation d'importer n'a pas été signée par le ministre.

	rendement à 50 % de lumière**	rendement à 20 % de lumière**
Brachiaria decumbens	55 %	13 %
Paspalum notatum	95 %	?
Neonotonia wightii	63 %	21 %

Tableau 2 Résistance à l'ombrage des plantes

** Les rendements sont comparés aux rendements à 100% de lumière

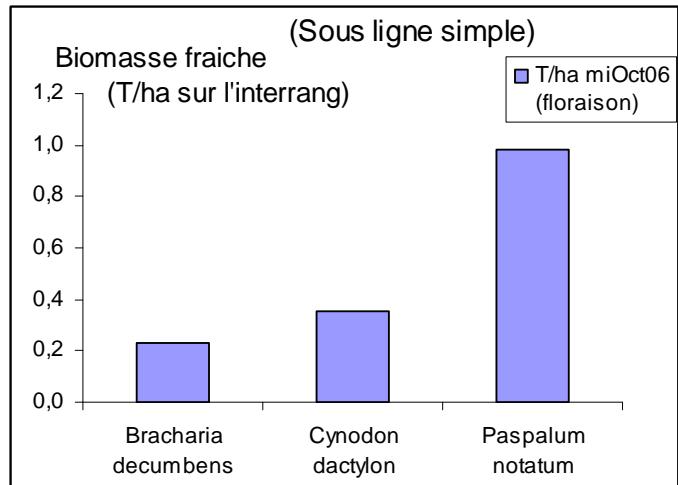


Tableau 3 Comportement sous ombrage dans une parcelle en ligne simple (R.Achard, communication personnelle)

b) Bananeraie établie en cycle 4

Dans cette expérimentation, le cultivar utilisé est le «902» un clone de Grande naine, commercialisé par Vitropic. Cette parcelle expérimentale a été mise en place début 2005. Le couvert végétal a été semé le 1^{er} décembre 2004 et les vitroplants plantés le 15 février 2005. La densité de plantation est de 1920 bananiers/ha. La surface spécifique par bananier est quant à elle de 5,2 m².

Les traitements expérimentaux ont été appliqués avec 4 répétitions (4 blocs), chaque placette expérimentale comportant entre 10 et 20 bananiers observés.

Le plan d'expérience est à **deux facteurs** :

- La couverture du sol :

- T0 = sol nu (= sol désherbé tous les 2 mois)
- T1 = Cynodon dactylon
- T2 = Brachiaria decumbens

D'après les observations faites sur le terrain, nous avons fait **l'hypothèse que les couverts sur T1 et T2 ont évolué vers une seule et même couverture spontanée**, mélange de 5 espèces :

- Brachiaria decumbens
- Paspalum Conjugatum
- Digitaria ? (n'a pas pu être déterminée)
- Axonopus compressus
- Kyllinga brevifolia

Nous allons par la suite tester cette hypothèse.

- Le niveau de fertilisation :

- X = fertilisation limitante (i.e pas de fertilisation)
- N = fertilisation non limitante : 23 g d'azote par pied tous les 2 mois (voir itinéraire technique en Annexe 1 pour les dates et quantités d'apport exacts)

Le dispositif avec deux niveaux de fertilisation a été mis en place dans l'optique de mettre en évidence une éventuelle interaction fertilisation/association : l'effet de la concurrence peut-il être compensé par une fertilisation non limitante ?

Le dispositif mis en place est dit en double rang : la distance entre deux rangs est de 1,4 m pour le petit rang, et de 5,1 m pour le grand rang (voire configuration Figure 12). La distance entre deux bananiers d'une même ligne est quant à elle de 1,5 m. Les résidus de culture du bananier sont disposés dans le petit inter rang.

Ce type de plantation reste conforme aux pratiques de la plupart des agriculteurs en Martinique et facilite les soins au pied du bananier (épandage des fertilisants et des pesticides en couronne au pied du bananier). L'enherbement de la parcelle a cependant nécessité une modification du dispositif de plantation : la plupart des agriculteurs plantent en double rang avec un petit inter rang de 1,8 m et un grand inter rang de 3,6 m. Les résidus de cultures sont quant à eux disposés dans le grand rang. Afin de pouvoir planter un couvert végétal, il a été décidé de :

- disposer les résidus dans le petit rang. En effet, la minéralisation des résidus fournit au sol de l'azote. Or dans le grand rang, cet azote n'est que peu disponible pour le bananier dont les racines n'explorcent presque pas cette zone. En revanche, les ressources en azote du petit rang sont plus accessibles aux racines. La disposition des résidus dans le petit rang favorise donc un meilleur recyclage de l'azote en bananeraie.
- d'agrandir le grand inter rang afin de pouvoir faciliter l'implantation et l'entretien du couvert végétal (passages pour les fauches facilités, plus de lumière si le grand rang est agrandi pour le maintien des graminées sensibles à l'ombrage).
- Diminuer le petit rang. Disposer les résidus dans le petit rang et réduire sa taille permettra de limiter considérablement le développement du couvert et des adventices qu'il est difficile de couper mécaniquement dans le petit rang.

En revanche, la distance habituelle entre 2 bananiers d'une même ligne est de 2 m. Elle a été réduite à 1,5 m afin d'avoir une densité de plantation similaire (1920 ban/ha au lieu de 1850 ban/ha en temps normal).

Présentation de l'itinéraire technique en annexe 1

c) Nouvelle bananeraie en 1^{er} cycle

Afin d'évaluer la concurrence de la plante de couverture durant la phase d'installation de la bananeraie, un dispositif expérimental a été mis en place. En raison des faibles disponibilités en terrain et des limites de la main d'œuvre disponible pour faire les mesures, nous avons opté pour une parcelle expérimentale de 2100 m² où on a planté 500 vitroplants du cultivar «902» : d'où une densité de plantation de 2380 bananiers/ha. La surface spécifique par bananier est quant à elle de 4,2 m².

Les traitements expérimentaux ont été appliqués avec 4 répétitions (4 blocs), chaque placette expérimentale comportant 10 bananiers observés.

Le plan d'expérience est à un facteur :

- la couverture du sol :
- T0 = sol nu (= désherbé tous les 2 mois)
- T1 = Paspalum notatum
- T2 = Brachiaria decumbens
- T3 = Neonotonia Wightii

Les couverts ont été semés le 5 mars 2008, un mois avant la plantation des vitroplants.

Nous avons opté pour un dispositif de plantation en double rang, afin d'être dans la même configuration que l'essai en bananeraie établie. La distance entre deux rangs est de 1,4 m pour le petit inter-rang, et de 3,8 m pour le grand inter-rang. Les distances ont du être légèrement diminuées par rapport au dispositif de plantation de l'essai en bananeraie établie car les disponibilités en terrain étaient limitées. La densité de plantation est donc nettement supérieure.

Présentation de l'itinéraire technique en annexe 2

C. Protocoles et procédures analytiques

Le temps imparti pour effectuer les expérimentations étant limitée à 4 mois, il a été nécessaire de limiter la quantité de mesures à recueillir. Effectuer un bilan de l'azote en bananeraie enherbée aurait nécessité de nombreuses expérimentations : mesure de la minéralisation du sol, de la dégradation des résidus, de la lixiviation des nitrates et du ruissellement. Ceci n'étant pas réalisable en 4 mois, il a été décidé de faire un **suivi dynamique de l'azote dans le sol et de caractériser la croissance et la teneur en azote des bananiers et de la plante de couverture**.

Afin de tester l'hypothèse 2 **d'hétérogénéité spatiale en bananeraie enherbée**, nous allons effectuer ces suivis sur plusieurs zones :

- ❖ Nous avons choisi d'effectuer le suivi dynamique de l'azote dans le grand rang (minéralisation des résidus de la plante de couverture), au pied du bananier (apport d'engrais) et dans le petit rang (minéralisation des résidus de bananier).
- ❖ Quant à la caractérisation de la croissance et de la teneur en azote de la plante de couverture, nous avons décidé de l'effectuer au pied du bananier et dans le grand rang.

Les protocoles et procédures analytiques pour effectuer ces suivis sont présentés ci-dessous.

1. Suivi de l'azote dans le sol

a) Echantillonnage du sol en bananeraie

Afin d'étudier la dynamique de l'azote minéral pour les différents traitements mis en place (sol nu, avec couvert végétal, fertilisé, non fertilisé), nous avons procédé à des échantillonnages de sol sur les différentes placettes. Les prélèvements sont effectués, autant que faire ce peut juste avant la fertilisation (afin de mettre en évidence si l'azote minéral a été limitant dans le sol) et une dizaine de jours après (temps nécessaire à l'urée pour passer sous la forme NH₄⁺ ou NO₃⁻, formes biodisponibles pour les végétaux).

D'après (Godefroy, 1990), pour le dosage de l'azote minéral du sol, on obtient une précision de 22 % avec un prélèvement fait de 15 échantillons composites (18 % de précision avec 30 échantillons composites, 48 % avec 5 échantillons composites, 28 % avec 10 échantillons composites).

Le meilleur compromis entre :

- la précision obtenue
 - la quantité de travail nécessaire à l'échantillonnage
 - la préservation de la parcelle : il ne faut pas effectuer plus d'un trou par bananier, sinon on risque d'affecter la croissance racinaire
- semblait être de faire un mélange composite de 15 points pour la bananeraie établie et 10 points pour la bananeraie en 1^{er} cycle (placettes plus petites).

Les prélèvements sont effectués à la tarière **au pied du bananier, au milieu du grand rang et au milieu du petit rang** sur 30 cm.

La cohérence et la précision des résultats obtenus ont été vérifiées en faisant un doublon de 2 échantillons (Bloc 1 T0 X BA et Bloc 1 T0 N BA). On obtient respectivement un écarts type de 2,4 et 1,97 mg/kg de sol frais.

b) Dosage de l'azote minéral du sol

L'échantillon est homogénéisé au bord du champ puis conservé au frigo.

Mesure de l'humidité pondérale :

Prélèvement de 30 g environ de l'échantillon considéré.

Pesée de la tare, puis pesée brut sol frais sur balance précision 10⁻⁴.

Séchage à l'étuve 105,00°C pendant 48H.

Mesure de l'azote minéral :

- Pour chaque échantillon de sol prélevé, plus un échantillon de sol témoin :

Mettre 50 g de sol dans un flacon.

Ajouter 200 mL de KCl 1N.

- Faire un échantillon témoin avec 200 mL de KCL 1N

Agiter pendant 2H avec un agitateur rotatif.

Filtration. Récupération du filtrat dans erlenmeyer de 300mL.

Dosage par colorimétrie avec auto analyseur avec une gamme de solutions étalons

c) Dosage de l'azote et du carbone organique du sol

On effectue un dosage de l'azote et du carbone organique du sol pour voir s'il y a une évolution de la teneur en matière organique.

Protocole :

Le sol est séché, broyé et tamisé à 2mm.

Le dosage de l'azote total et du carbone organique du sol se fait par combustion sèche, avec un autoanalyseur CNS au laboratoire de pédologie du CIRAD.

2. Observation du fonctionnement des couverts

Afin de mettre en évidence une éventuelle concurrence entre les deux couverts, il est nécessaire de mesurer les différents paramètres de croissance du bananier et de la plante de couverture (teneur en azote, biomasse, LAI). En outre, ces mesures vont nous permettre de paramétrier et de valider le modèle :

- mesures de croissance de la plante de couverture (LAI, teneur en azote, allure de croissance) pour le paramétrage du module plante de couverture
- mesures de croissance de la bananeraie pour valider le modèle en comparant les données observées aux données simulées

a) Suivi du fonctionnement de la bananeraie

i Mesure et estimation de la teneur en azote du bananier

Estimation de la teneur en azote du bananier :

La satisfaction des besoins en azote a été évaluée mensuellement en réalisant la mesure de SPAD sur la deuxième feuille des bananiers (index mesuré optiquement par un Chlorophyll meter Minolta modèle S.P.A.D 502).

La mesure individuelle sur un bananier consiste en une moyenne de dix points de mesure sur le ½ limbe gauche de la 2^{ème} feuille.



Figure 16Chlorophyll meter Minolta modèle S.P.A.D 502

Mesure de la teneur en azote de la feuille II du bananier :

Une bande de 15 cm de large du ½ limbe gauche de la 2^{ème} feuille a été prélevé sur chaque bananier mesuré. Les échantillons ont été réunis par placette puis lavés, séchés à 60°C et enfin broyés à 0,5 mm. Le dosage de l'azote total se fait par combustion sèche, avec un autoanalyseur CNS au laboratoire de pédologie du CIRAD.

Une mesure de confirmation de la relation SPAD-teneur en azote (R.Anchard, 2006) a été faite en juin sur les feuilles II de bananier.

On obtient la relation linéaire suivante (Figure 17), avec un coefficient de régression de 0.782.

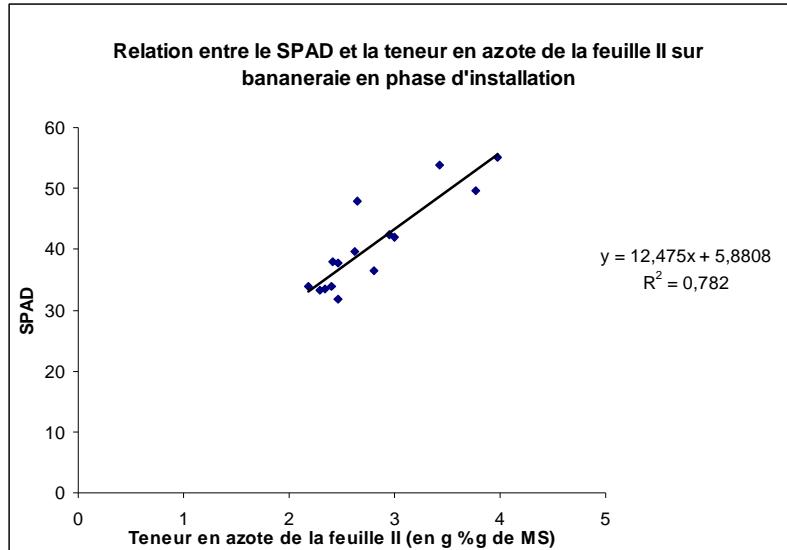


Figure 17 Estimation de la teneur en azote de la feuille II de bananier par le SPAD

Estimation de la nutrition azotée du bananier par le calcul de l'INN :

Le calcul de l'INN ne peut être effectué que sur bananeraie établie puisque la courbe de dilution n'est valable que pour un couvert fermé, ce qui n'est pas le cas en bananeraie en phase d'installation.

Calcul d'un indice de nutrition azotée en prenant la courbe de dilution de l'azote des plantes en C3 comme référence pour le statut azoté. En effet, d'après Thieuleux, 2006, le bananier suit la courbe de dilution de l'azote des plantes en C3 lorsque la bananeraie est établie.

Courbe de dilution de l'azote pour les plantes en C3:

- si MS produite < 2 tonnes/ha, alors %N = 4%
- sinon, %N = $5,7 \cdot MS^{-0,5}$

Relations empiriques utilisées pour l'estimation de la teneur en azote des bananiers:
(R.Achard, communication personnelle)

$$\%N \text{ de la feuille II} = (SPAD - 31,35) / 6,31 \quad r^2 = 0,65$$

$$\%N \text{ du bananier} = 0,6 * \%N \text{ feuille II} - 0,14 \quad r^2 = 0,71$$

$$\text{Matière Sèche Totale (kg)} = 0,0007 * \text{circ}^2 + 0,0084 * \text{circ} - 0,5969 \quad r^2 = 0,9553$$

Avec :

Circ : circonférence à 30 cm du sol en cm

$$INN = \frac{\%N_{\text{mesuré}}}{\%N_{\text{courbe de dilution}}}$$

ii Mesure de la croissance de la bananeraie

Environs une fois par mois, à partir du début du 4^{ème} cycle (fin janvier 2008) pour la bananeraie établie et à partir de la plantation pour le nouvel essai (mi avril 2008), les données suivantes sur la croissance des bananiers ont été mesurées :

- la hauteur du bananier en cm (à la fourche des deux dernières feuilles)
- la circonférence du pseudotronec à 30 cm du sol en cm
- le nombre de feuilles émises
- la longueur et largeur de la feuille II en cm

Nous avons essayé de faire coïncider au maximum les dates d'observation de la croissance des couverts (bananeraie et plante de couverture) avec les prélevements de sol. Ces données seront utilisées comme indicateurs de biomasse (circonférence, hauteur et nombre de feuilles émises).

iii Mesure du LAI des bananiers:

En bananeraie établie :

Les données mesurées au champ sont la longueur et la largeur de la feuille II à un temps donné.

La surface d'une feuille de bananier sera assimilée à une ellipse, d'où la formule suivante pour calculer la surface totale de la feuille II :

$$SF_{feuille\ II} = \frac{\pi \times L \times La}{4}$$

Avec

SF_{feuille II} : surface de la feuille II en cm²

L : longueur de la feuille II du bananier en cm

La : largeur de la feuille II du bananier en cm

Afin d'évaluer la surface foliaire totale du bananier, on utilise une formule empirique déterminée par Pendant Johanne dans son rapport de stage de fin d'étude :

$$SF_{totale} = 5,98 \times SF_{feuille\ II} - 6645,3$$

Avec

SF_{totale} : surface foliaire du bananier en cm²

SF_{feuille II} : surface de la feuille II en cm²

D'après le dispositif expérimental, la surface spécifique par bananier est de 5,43 m²/bananier.

On obtient donc le LAI par la formule suivante :

$$LAI = \frac{SF_{totale}}{5,43}$$

En bananeraie en phase d'installation :

La structure foliaire d'un bananier en phase d'installation est très différente de celle d'un bananier en cycle 2,3 ou 4. Les formules empiriques disponibles ne sont pas valables pour les bananiers en cycle 1. Or les seules données mesurées sur le terrain sont la longueur et la largeur de la feuille II, ainsi que le nombre de feuilles émises. Il est donc nécessaire de faire des approximations : on estime que toutes les feuilles ont la même surface.

La surface d'une feuille de bananier est assimilée à une ellipse, d'où la formule suivante pour calculer la surface totale de la feuille II :

$$SF_{feuille\ II} = \frac{\pi \times L \times La}{4}$$

Avec

SFfeuille II : surface de la feuille II en cm²

L : longueur de la feuille II du bananier en cm

La : largeur de la feuille II du bananier en cm

On obtient la surface foliaire totale du bananier :

$$SF_{totale} = SF_{feuille\ II} \times Nb_{feuilles\ émises}$$

Avec

SFtotale : surface foliaire du bananier en cm²

SFfeuille II : surface de la feuille II en cm²

Nbfeuilles émises : nombre de feuilles émises

D'après le dispositif expérimental, la surface spécifique par bananier est de 2100 m²/500 bananiers = 4,2 m²/bananier

On obtient donc le LAI par la formule suivante :

$$LAI = \frac{SF_{totale}}{4,2}$$

b) Suivi du fonctionnement de la plante de couverture

i Mesure de la teneur en azote des graminées

Prélèvement d'un échantillonnage représentatif (d'au moins 100 g), le peser en frais et le repeser après séchage à l'étuve ventilée à 60°C pendant 2 jours. Broyage des échantillons à 0,5 mm et dosage de l'azote et du carbone par combustion sèche avec un autoanalyseur CNS par le laboratoire de pédologie du CIRAD.

ii Production de biomasse de la plante de couverture

Afin d'obtenir une approximation de la courbe logistique de croissance de la plante de couverture, une mesure de la biomasse a été faite en trois points : juste après la coupe, 1 mois après la coupe, 3 mois après la coupe.

Protocole : Biomasse aérienne produite à chaque coupe (kg MS/ha)

Au pied du bananier et au milieu du grand rang, récolter au ras du sol et peser la biomasse fraîche fauchée (2 carrés de 50 cm x 50 cm) dans chaque parcelle.

Prélever un échantillonnage représentatif (d'au moins 100 g) le peser en frais et le repeser après séchage à l'étuve ventilée à 60°C pensant 2 jours. Broyer les échantillons et doser l'azote et le carbone.

Finalement, estimer le rendement en matière sèche (MS) sur la base de la parcelle et convertir en kg MS/ha.

iii Mesure de la surface foliaire du couvert de graminées

Protocole expérimental :

Prélever un petit échantillon représentatif du couvert sur bananeraie établie : T1 et T2 (mélange des 5 graminées) ; et sur jeune bananeraie : T1 (*Paspalum notatum*) , T2 (*Brachiaria decumbens*).

Pour chaque échantillon, le peser en frais, ensuite séparer les feuilles des tiges, puis scanner les feuilles en mode noir et blanc (exemple en Annexe 1). La surface foliaire peut ensuite être mesurée à l'aide d'un logiciel type Photoshop qui donne la proportion de pixel noir, convertible en surface à partir de la surface scannée.

On obtient la surface massique du couvert ou SLA (Surface Leaf Area) :

$$\text{SLA} = P_{\text{échantillon}} / SF_{\text{échantillon}}$$

Avec :

SLA : Surface Leaf Area ou surface massique en m^2/kg

$P_{\text{échantillon}}$: Poids de l'échantillon (feuilles et tiges) en kg

$SF_{\text{échantillon}}$: Surface foliaire de l'échantillon en m^2

Avec les mesures de biomasse effectuées précédemment, on peut calculer l'évolution du LAI en fonction du temps.

$$\text{LAI}_t = \text{Biomasse}_t \times \text{SLA}$$

Avec :

LAI_t : Leaf Area Index (ou indice foliaire) au temps t sans dimension

Biomasse_t : biomasse du couvert au temps t en kg/m^2

SLA : Surface Leaf Area ou surface massique en m^2/kg

3. Suivis tensiométriques dans la bananeraie

Afin de s'affranchir de toute concurrence hydrique entre la plante de couverture et le bananier, et ainsi de se concentrer sur l'étude de la compétition pour l'azote, nous avons irrigué les parcelles expérimentales de la façon suivante : le suivi tensiométrique, effectué chaque semaine au pied des bananiers permet de s'assurer que le confort hydrique est atteint, et si ce n'est pas le cas, de gérer l'irrigation en conséquence. L'irrigation sur frondaison a été déclenchée lorsque la tension à 30 cm de profondeur du sol au pied du bananier (zone où la consommation en eau est la plus forte) dépassait entre 250 et 300 mbar (soit une humidité de 45 à 48% environ ; Figure 18).

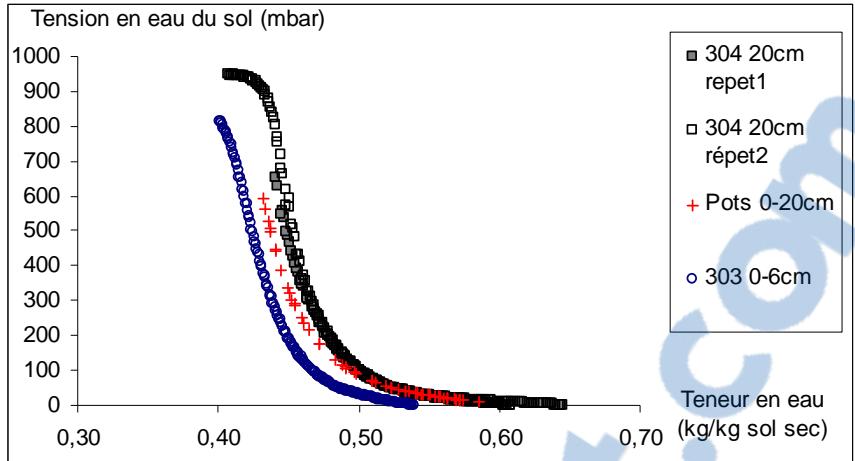


Figure 18Courbe tension-humidité pour le sol de la parcelle « Ponterre » de Rivière Lézarde (Laboratoire PRAM-IRD)

Les apports d'irrigation consistaient en des apports de 10 à 15 mm par aspersion sur frondaison. Cette dose est ensuite renouvelée et ajusté en fonction d'un calcul du déficit du bilan hydrique en s'assurant que le sol ne dépassait pas la capacité au champ après les irrigations (tension supérieure à 100 mbar, soit 48-50% d'humidité). Les réserves en eau du sol de la bananeraie sont ainsi maintenues en permanence au dessus de la réserve facilement utilisable et on peu ainsi assurer une alimentation en eau optimale du bananier, sans pour autant favoriser le lessivage.

4. Mesure de la température dans la bananeraie

La température dans la bananeraie influe directement sur la durée du cycle (Lassoudière, 2007). Afin de déterminer si un éventuel retard de croissance peut être du à une baisse de la température dans la bananeraie enherbée, un dispositif de mesure de la température a été mis en place.

Pour évaluer l'incidence d'un couvert vivant via un effet thermique, des enregistrements de température dans les couverts ont été réalisés. En effet, des effets thermiques pourraient entraîner au niveau du méristème du bananier des retards de développement. Le méristème se trouvant à 10 cm de hauteur dans le pseudo-tronc, des capteurs de température (Tynitag Ultra2) ont été placés à 10 cm du sol sur la ligne de bananiers dans un tube en PVC (protection du capteur du rayonnement solaire direct) et ont enregistré les températures tous les ¼ d'heure. Une température de référence à 150 cm sur sol nu a également été enregistrée.

Sur bananeraie établie :

3 capteurs de température sur le bloc 2 :

1 sur T0 (=sol nu)

1 sur T1 (=Cynodon dactylon)

1 sur T2 (=Brachiaria decumbens)

Un capteur a été placé pour enregistrer une température de référence à 150 cm du sol sous le couvert de bananier sur sol nu

Idem sur le bloc 3

Sur bananeraie en phase d'installation :

4 capteurs de température sur le bloc 1 :

1 sur T0 (=sol nu)

1 sur T1 (=Paspalum notatum)

1 sur T2 (=Brachiaria decumbens)

1 sur T3 (=Neonotonia wighii)

De même que sur bananeraie établie, comme référence, la température à 150 cm du sol sous le couvert de bananier sur sol nu a été enregistrée.

Les capteurs ont été placés le 5 juin 2008 et relevés le 21 août 2008.

D. Traitements statistiques

Les données obtenues au cours des expérimentations ont été analysées à l'aide du logiciel statbox®. Une analyse de la variance a été effectuée sur les différentes mesures de croissance du bananier (Hauteur, circonférence, nombre de feuilles émises, longueur et largeur de la feuille II, SPAD), afin de tester si les effets des traitements (niveau de fertilisation et couverture du sol) sur la croissance et le développement du bananier sont identiques ou non.

Plans d'expérience :

Sur bananeraie établie, on effectue une Anova sur 4 blocs, à deux facteurs qualitatifs en criss cross. Les deux facteurs à tester sont :

- La couverture du sol (à trois niveaux) : sol nu (T0), Cynodon (T1), Brachiaria (T2)
- la fertilisation (à deux niveaux) : pas de fertilisation (X), fertilisation non limitante (N)

Sur la bananeraie en phase d'installation, on effectue une Anova à un facteur qualitatif à quatre niveaux et 4 blocs, la couverture du sol : sol nu (T0), Paspalum Notatum (T1), Brachiaria decumbens (T2), Neonotonia (T3).

E. Construction du modèle SIMBA-IC

La construction du modèle SIMBA-IC (Inter Crop) s'est effectuée autour de deux axes principaux :

- l'introduction d'un module plante de couverture
- la spatialisation du fonctionnement azoté de l'interface plante-sol

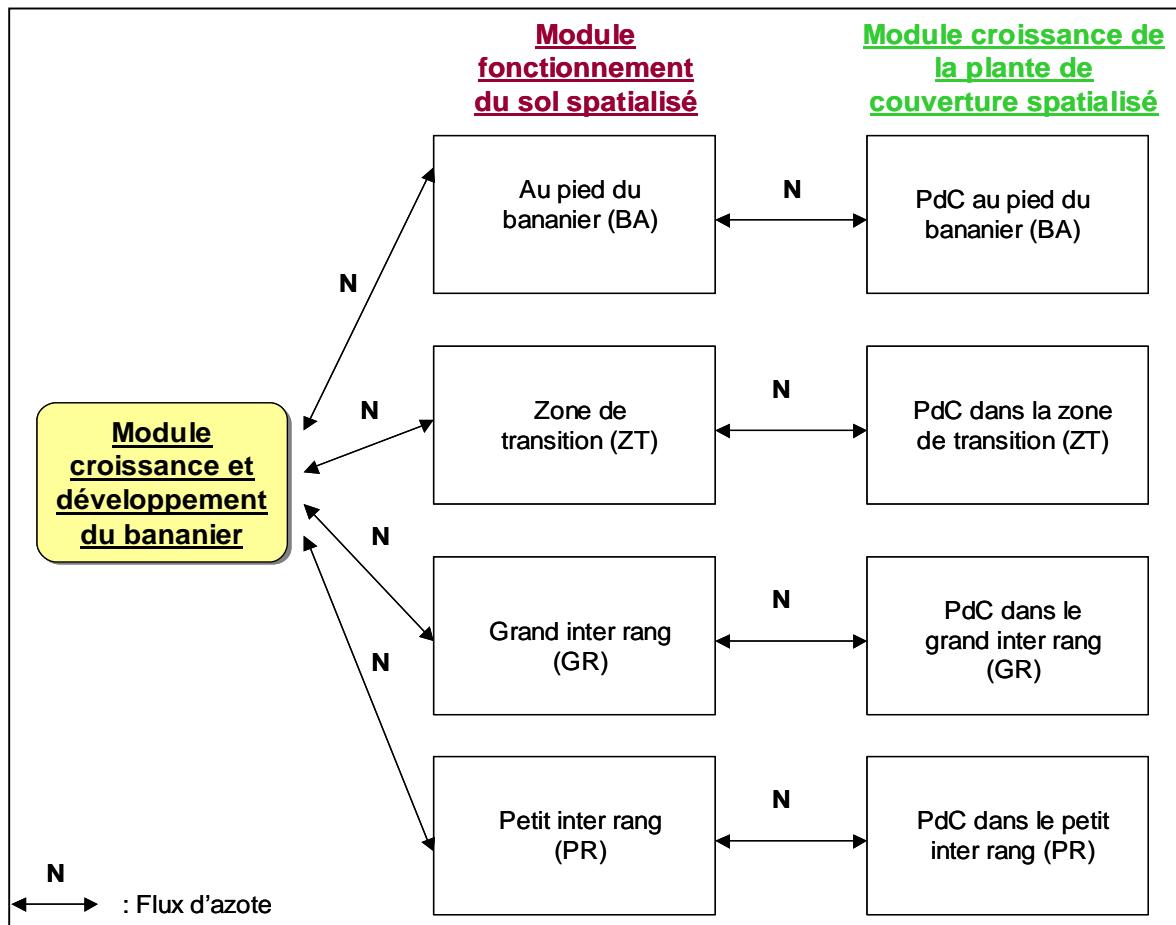


Figure 19 Architecture du modèle SIMBA-IC

1. Conception du module plante de couverture :

La **croissance de la plante de couverture** est simulée selon un formalisme classique, basé sur l'interception du rayonnement. La **teneur en azote de la plante de couverture (NCcc)** est un paramètre mesuré au champs.

Module de croissance plante de couverture

Variables

LAIcc(j,t) : indice de surface foliaire de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($m^2.m^{-2}$)

BIOMcc(j,t) : biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t (kg)

deltaBIOMcc(j,t) : formation de biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t (kg)

deltaLAIcc(j,t) : variation d'indice de surface foliaire de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($m^2.m^{-2}$)

PARcc(j,t) : rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($MJ.m^{-2}$)

Stresscc(j,t) : Coefficient de stress azoté de croissance en biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t

PLAI(j,t) : pourcentage de LAI bananier dans le compartiment j au pas de temps t (%)

KI(j,t) : coefficient d'interception du rayonnement par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

RGcc(j,t) : rayonnement disponible pour la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($MJ.m^{-2}$)

Ncc(j,t) : prélèvement en azote de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t

Paramètres

Klaiban : coefficient de la droite d'interception du rayonnement par la LAI bananier (0.23)

Kcc_{intercept} : coefficient d'interception du rayonnement par la plante de couverture

acc_{biom} ; bcc_{biom} : coefficients de la parabole reliant le rayonnement intercepté et la biomasse formée par la plante de couverture

SLAcc : surface massique des feuilles de plante de couverture ($m^2.kg^{-1}$)

NCcc : concentration d'azote dans la biomasse de plante de couverture

Equations

$$PLAI(j,t) = PER(j,t)$$

$$KI(j,t) = Klaiban \cdot LAI(i,t) \cdot PLAI(j,t)$$

$$RGcc(j,t) = Rg(t) * (1 - KI(j,t))$$

$$PARcc(j,t) = (0.95 * 0.48) \cdot RGcc(t) \cdot (1 - EXP(-Kccintercep * LAIcc(j,t)))$$

$$\text{deltaBIOMcc}(j,t) = (\text{acc}_{\text{biom}} \cdot \text{PARcc}(j,t)^2 + \text{bcc}_{\text{biom}} \cdot \text{PARcc}(j,t)) \cdot \text{Stresscc}(t)$$

$$\text{deltaLAIcc}(j,t) = \text{deltaBIOMcc}(j,t) \cdot SLAcc$$

$$BIOM(j,t) = BIOM(t-1) + \text{deltaBIOM}(j,t)$$

$$LAIcc(j,t) = LAIcc(j,t-1) + \text{deltaLAI}(j,t)$$

$$Ncc(j,t) = \text{deltaBIOMcc}(j,t) \cdot CNcc$$

$$\text{Stresscc}(j,t) = N(j,t) / Ncc(j,t)$$

2. Spatialisation du fonctionnement azoté de l'interface plante-sol :

L'association bananier/plante de couverture présentant des hétérogénéités spatiales originales du fait de la structure des deux peuplements, nous avons défini les différents compartiments ainsi :

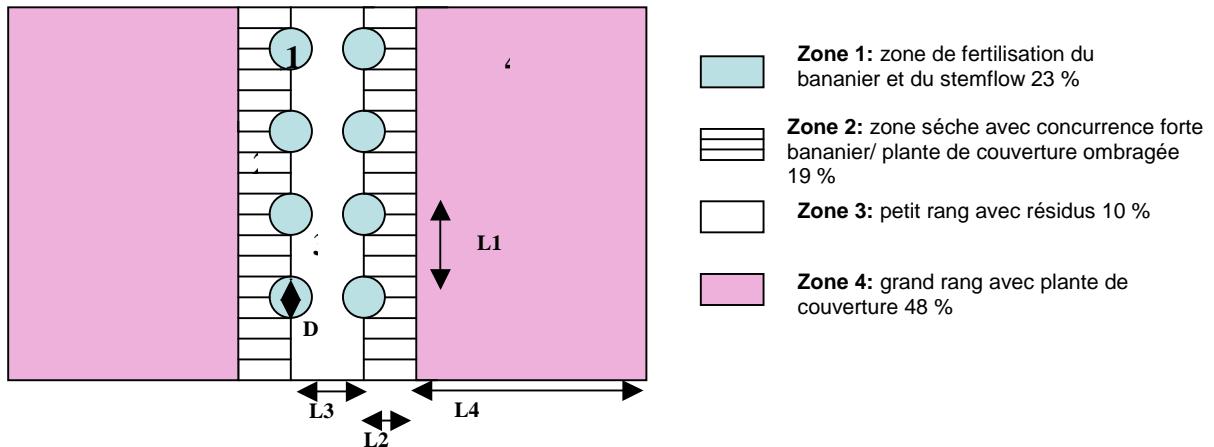


Figure 20 Schéma de la spatialisation de la bananeraie en 4 zones

Dimensions :

L1 = distance entre 2 bananiers 1,5 m
 L2 = zone de transition 1 m
 L3 = petit inter rang 1,4 m
 L4 = grand inter rang 3,2 m
 D = diamètre de la zone fertilisée 1,2 m

On obtient les pourcentages de chaque zone suivants :

Zone 1 BA : 23 %
 Zone 2 ZT : 19 %
 Zone 3 PR : 10 %
 Zone 4 GR : 48%

Module spatialisation du bilan azoté

Variables

PER(j,t) : pourcentage d'exploration racinaire du bananier dans le compartiment j au pas de temps t

N(j,t) : stock d'azote dans le sol du compartiment j au pas de temps t (Kg)

PPMN(j,t) : concentration en azote dans le sol du compartiment j au pas de temps t

Npot(j,t) : Azote potentiellement utilisable par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

Npottot(t) : Azote total potentiellement utilisable par le bananier au pas de temps t

NP(j,t) : azote prélevé par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

Ndemandej(j,t) : demande en azote du bananier dans le compartiment j au pas de temps t

Ndemande(t) : demande en azote du bananier au pas de temps t

PCV(i,t) : azote remobilisé de la souche du cycle i-1 au pas de temps t

Paramètres

$p(j)$: pourcentage de surface du compartiment j (%)

ds : densité du sol

pr : profondeur de sol (m)

Equations

$$PER(j,t) = f(LAI(t)) \longrightarrow$$

$$PPMN(j,t) = \frac{\sum_{j=1}^{j=1} N(j,t)}{ds.pr.p(j)}$$

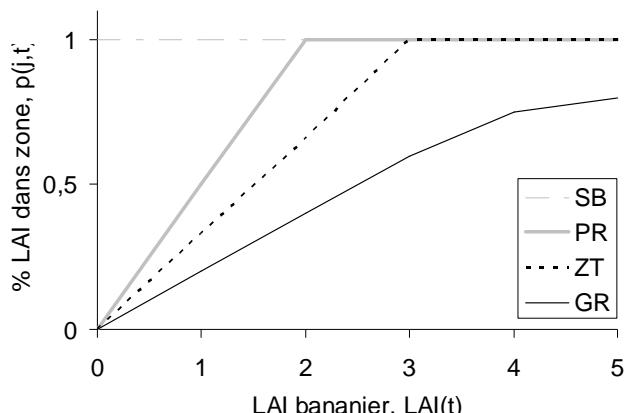
$$Npot(j,t) = PPMN(j,t).10000.PER(j,t)$$

$$Npottot(t) = \sum Npot(j,t)$$

$$Ndemande(t) = \sum_{i=4}^4 \delta BIOM(i,t).NC(t) - PVC(i,t)$$

$$Ndemandej(j,t) = Ndemande(t).(\frac{Npot(j,t)}{Ntot(t)})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{- si } Ndemandej(j,t) + Nvv(j,t) \geq N(j,t) \\ \text{- alors } Nprelevreel(j,t) = Ndemandej(j,t) \\ \text{- sinon } Nprelevreel(j,t) = N(j,t) - Ncc(j,t) \end{array} \right.$$



IV. Résultats et interprétations des expérimentations en bananeraie enherbée

A. Etude de la concurrence pour les ressources et effet sur le développement et la croissance du bananier

Les dispositifs expérimentaux mis en place nous ont permis d'étudier l'effet de l'introduction de la plante de couverture en bananeraie. Le double dispositif nous a permis de caractériser la concurrence qui a eu lieu selon la phase de développement de la bananeraie (i.e en phase d'installation ou établie). Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés ci-dessous.

1. Lorsque la bananeraie est établie (4ème cycle)

a) Mise en évidence d'un retard de croissance

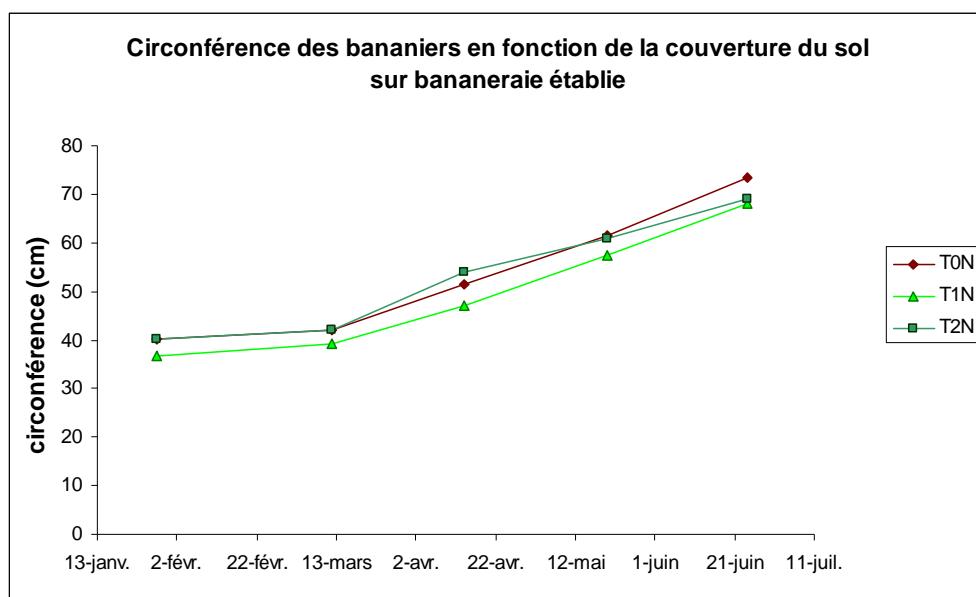


Figure 21 Circonférence des bananiers selon la couverture du sol sur bananeraie établie et fertilisée

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0	N	70,943	A	
1.0	X	66,175		B

Tableau 4Anova sur les circonférences des bananiers sur bananeraie établie: effet significatif de la fertilisation

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	T0	72,005	A	
2.0	T1	67,056		B
3.0	T2	66,616		B

Tableau 5 Anova sur les circonférences des bananiers sur bananeraie établie: effet significatif de l'association

Lors de la dernière observation, et après traitements statistiques, on observe que l'effet de la fertilisation est significatif (Tableau 4), mais également l'effet de l'association (Tableau 5). En revanche, l'interaction entre les traitements présence/absence d'une couverture du sol et fertilisation n'est pas significative.

La différence de croissance liée à l'absence de fertilisation (X) n'est pas surprenante, on note cependant une différence relativement modeste de 5 cm en circonférence au regard de la différence de fertilisation reçue (pratiquement 90 UN/ha sur 5 mois). On observe une différence significative de croissance entre d'un coté T0 et de l'autre T1 et T2 (-5 cm de circonférence). Cet effet montre bien qu'il existe, même en bananeraie établie un effet dépressif du maintien d'un couvert vivant en bananeraie.

L'absence d'interaction entre association ou non avec une couverture de graminée et fertilisation peut s'expliquer de plusieurs façons :

- le dispositif expérimental n'a pas été suffisamment précis pour le mettre en évidence. La puissance de l'essai de 74 % indique que ce n'est probablement pas le cas.
- l'association avec une graminée s'est traduite par une concurrence pour les ressources qui a eu un effet additif avec le niveau de fertilisation.

Si cette deuxième hypothèse est acceptée, cela indique que la fertilisation azotée n'a pas permis de compenser la concurrence. Nous n'avons dans ce cas pas pu assurer une nutrition non limitante sur T1 et T2 comme cela était initialement visé, ou bien la concurrence c'est effectuée pour une autre ressource que l'azote. Nous allons donc dans le paragraphe suivant, **discuter de l'origine de la compétition** entre le bananier et la plante de couverture.

En outre, le fait que le retard de croissance soit le même sur T1 et sur T2 (Tableau 5) permet de corroborer l'hypothèse que nous avions émises sur **l'évolution des couvert T1 et T2 vers un même couvert spontané**.

b) Concurrence pour quelle(s) ressource(s) ?

La concurrence pour la lumière peut être écartée, puisqu'en bananeraie établie, la bananeraie est la canopée dominante. De même pour l'eau, l'irrigation a permis de maintenir la bananeraie en confort hydrique. Il reste donc la possibilité d'une concurrence pour les **éléments minéraux** (N, P, K, Mg, oligo éléments), un **effet allélopathique** de la plante de couverture sur la croissance du bananier, ou encore un effet développement via la **température**.

i Concurrence pour l'azote

Bilan azoté simplifié en bananeraie enherbée sur la base d'un cycle de 9 mois

- Apport par fertilisation : **200 Unités d'N/hectare**
- Besoins du bananier : **200 Unités d'N/hectare**
- Exportation par la plante de couverture : **180 Unités d'N/hectare** (donnée obtenue à partir des mesures de teneurs en azote de la plante de couverture et de leur production de biomasse)

Il apparaît évident que l'exportation d'azote par la plante de couverture représente un poste important. Bien que cet azote soit ensuite restitué lors de la fauche du couvert, il est momentanément indisponible pour le bananier et est potentiellement source d'une forte concurrence vis-à-vis du bananier.

Les résultats des tests statistiques sur les données SPAD (Tableau 6) vont dans le sens d'une nutrition effectivement limitante en azote. Il est nécessaire de passer à l'INN pour une interprétation plus globale du fonctionnement du couvert bananier.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	T0	50,24	A	
2.0	T1	45,877		B
3.0	T2	44,311		B

Tableau 6 Anova sur la teneur en chlorophylle des feuilles de bananiers du 24 juin, sur bananeraie établie et fertilisée: effet significatif de l'association

Utilisation d'un indicateur plante: l'INN

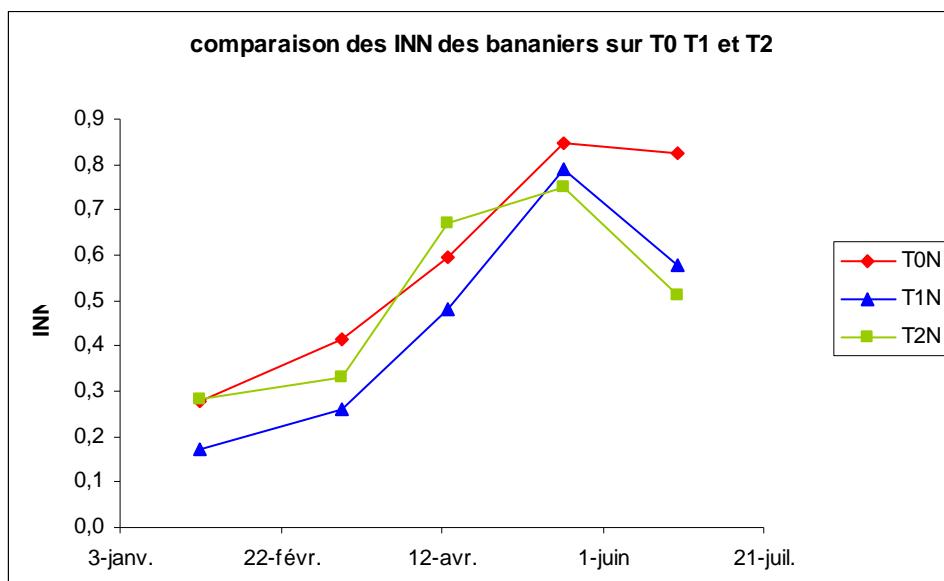


Figure 22 INN sur bananeraie établie et fertilisée en fonction de la couverture du sol

L'évolution de l'INN sur bananeraie établie et fertilisée (Figure 22) indique que l'on n'aurait pas eu d'effet d'une concurrence azotée jusqu'à mi mai, puis une forte concurrence en juin. Cette concurrence soudaine pourrait s'expliquer par :

- un effet avec retard de la faible disponibilité de fin mars
- des besoins du bananier et/ou de la plante de couverture accrus à une période de forte croissance

Il est difficile d'expliquer le fonctionnement exact entre sol et plante, le suivi sol et plante n'étant peut-être pas assez fréquent pour conclure. Ces hypothèses seront à retravailler ultérieurement. On met néanmoins bien en évidence un effet de concurrence pour l'azote, dont on sait qu'il peut être partiellement compensé par une fertilisation supérieure.

Par précaution, il est aussi important d'envisager de possibles déficiences sur les autres éléments dont la disponibilité pourrait avoir été limitante du fait d'une part d'une fertilisation uniquement azoté pendant la période étudiée et d'autre part une possible concurrence entre bananier et plante de couverture.

Utilisation de l'indicateur sol : teneur en N minéral du sol

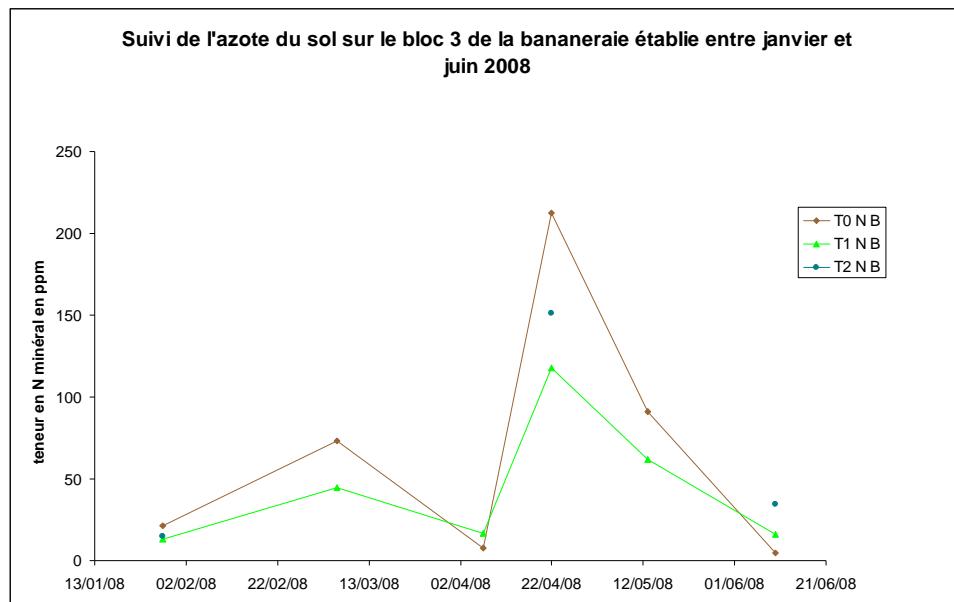


Figure 23 Dynamique de l'azote minéral du sol au pied du bananier: comparaison selon la couverture du sol

Figure 23 : On observe une bonne disponibilité en azote en mars au début du cycle étudié, à priori le bananier était en situation non limitante sur sol nu comme enherbé. Par la suite le renouvellement de la fertilisation a permis d'obtenir une situation non limitante sur la période mi avril- fin mai, ce qui est cohérent avec les résultats de la croissance du bananier : en effet à cette période on n'observe pas de différence de croissance entre T0 T1 et T2 (Figure 21). En revanche, à partir de mi juin on est situation limitante, aussi bien sur sol nu que enherbé. Il est donc difficile d'expliquer la compétition pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier, bien que les teneurs sur parcelles enherbées toujours inférieurs à celles sur sol nu semblent aller dans le sens d'une compétition pour l'azote.

ii Concurrence pour les autres éléments minéraux

Les parcelles ayant été fertilisées avec de l'urée, seulement de l'azote a été apporté au sol. Le déficit de croissance des bananiers que l'on observe sur parcelles enherbées pourrait être du à une carence en un ou plusieurs macro ou oligo éléments.

D'après les analyses de sol au pied du bananier, les teneurs en P, K, Ca et Mg ne varient pas d'une parcelle à l'autre (teneurs identiques sur T0, T1 et T2).

On observe même un léger enrichissement sur les parcelles enherbées (Figure 24,

Figure 25, Figure 26, et

Figure 27).

Cependant, hormis pour le potassium, ces différences ne sont pas significatives.

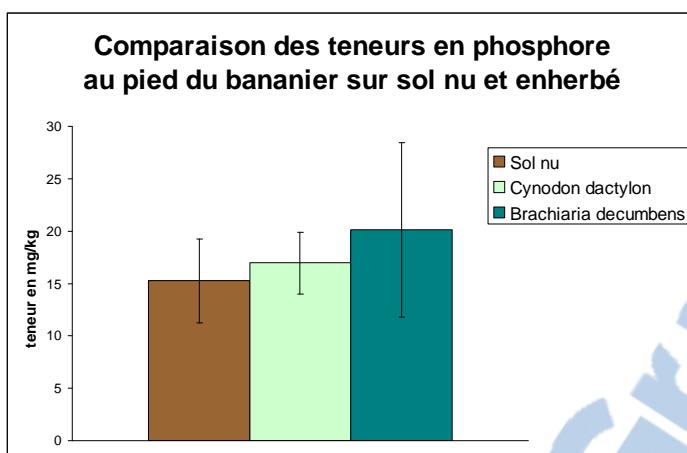


Figure 24 Teneur en phosphore

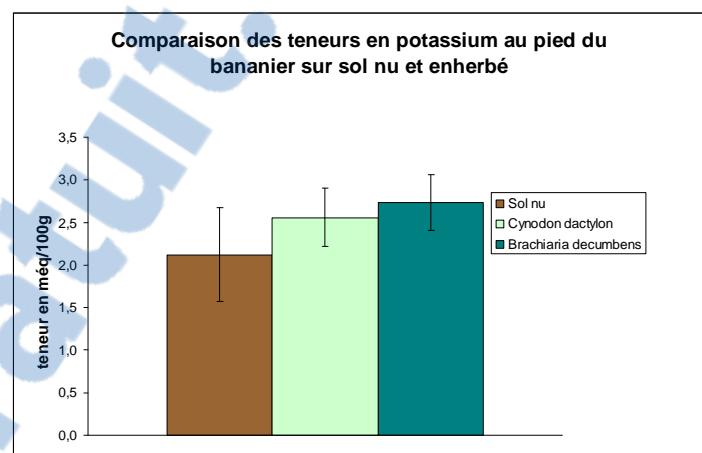


Figure 25 Teneur en potassium

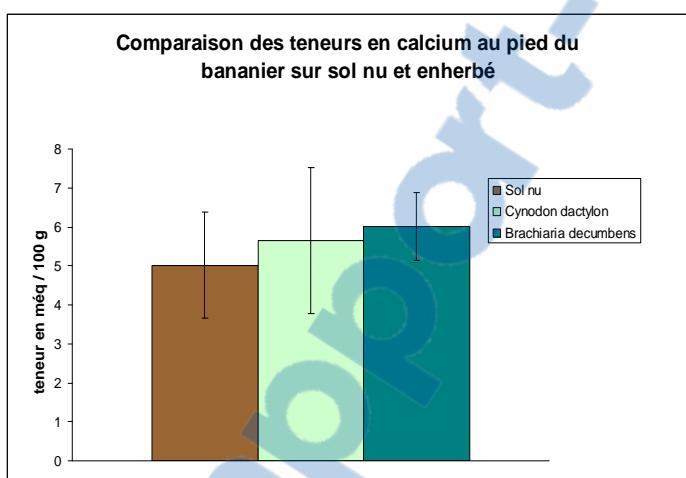


Figure 26 Teneur en calcium du sol

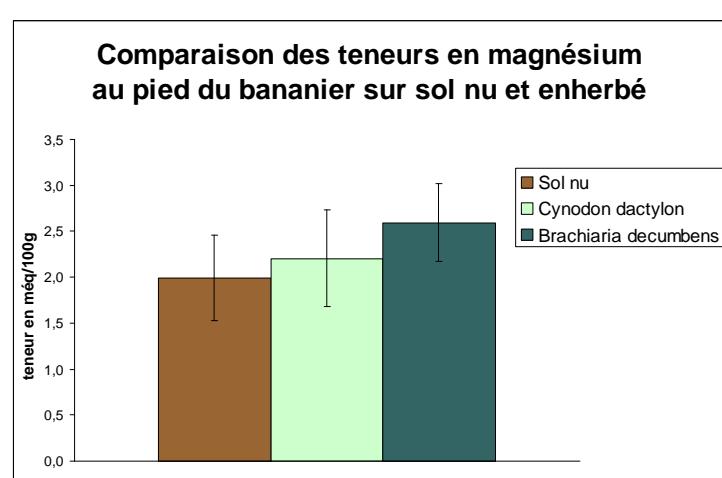


Figure 27 Teneur en magnesium

En outre, les teneurs en K, Ca et Mg au pied du bananier restent dans la gamme des valeurs préconisées pour un sol brun rouille à halloysite (Tableau 7). Il n'y a donc pas eu de carence pour ces éléments minéraux. A l'exception du phosphore dont la teneur est légèrement inférieure à celle préconisée. Cependant les teneurs sur parcelles enherbées sont supérieures à celle sur sol nu (bien que cette différence ne soit pas significative). La différence de croissance des bananiers que l'on observe entre parcelles sur sol nu et enherbée ne peut être la conséquence d'une carence en phosphore. Nous n'avons pas de données concernant les oligo

éléments (Fe, Cu, Zn...). Il n'est pas à exclure que l'un d'eux soit prélevé préférentiellement par la plante de couverture et induise ainsi une carence chez le bananier.

	Sol nu	Cynodon dactylon	Brachiaria decumbens	Teneur optimale
Potassium (en méq / 100g)	2,1	2,6	2,7	1,2 - 1,5
Calcium (en méq / 100g)	5,0	5,6	6,0	5 - 6
Magnésium (en méq / 100g)	2,0	2,2	2,6	2 - 2,5
Phosphore (en ppm)	15,3	17,0	20,1	25 - 50

Tableau 7 Teneurs optimales pour les principaux éléments minéraux sur sol brun rouille à halloysite

iii Température

D'après les mesures de température effectuées sur bananeraie enherbée et bananeraie sur sol nu, on n'observe pas de différence entre les températures à 10 cm du sol sur T0, T1 et T2. Cependant, les capteurs, à 10 cm du sol, n'étaient pas sous le couvert. Il existe peut être une différence de température au niveau du sol, qui pourrait avoir eu un effet sur le développement du bananier.

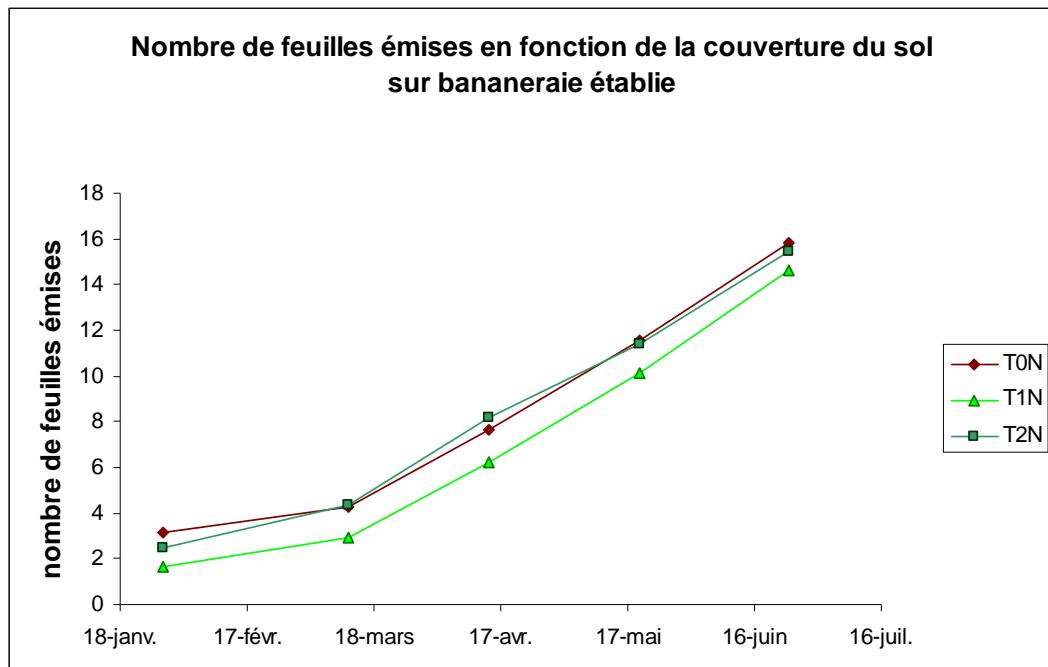


Figure 28 Nombre de feuilles émises sur bananeraie établie

Le nombre de feuilles émises n'étant pas la même à la première observation (Figure 28, T1 inférieur à T0 et T2), les tests statistiques ont été effectués sur la différence de feuilles émises entre mars et juin. Le test a d'abord été effectué avec les deux facteurs « fertilisation » et « association ».

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
			A	B
1.0	T0	11,718	A	
2.0	T1	11,412	A	
3.0	T2	10,609		B

Tableau 8 Anova sur le nombre de feuilles émises au 24 juin, sur bananeraie établie: effet significatif de l'association

Les résultats obtenus (Tableau 8) sont difficilement interprétables : en effet T2 présente une feuille émise en moins que T0 et T1. Or nous avons établi que la plante de couverture sur T1 et sur T2 présentait les mêmes caractéristiques (biomasse produite, espèces présentes...). La température est donc probablement la même sous T1 et T2 (cette hypothèse est de plus confirmée par les relevés de température). Si la différence de feuilles émises était due à un effet température, on devrait donc également avoir une feuille émise en moins sur T1. Une différence dans le nombre de feuilles émises peut également être due à un effet concurrence pour les ressources entre la plante de couverture et le bananier. Or nous avons montré dans le paragraphe précédent (mise en évidence d'un retard de croissance) que le retard de croissance observé sur T1 était le même que celui observé sur T2.

Ces résultats n'étant pas interprétables, nous avons choisi de faire les tests uniquement sur les parcelles en fertilisation non limitante (N).

Les moyennes sur T0 N, T1 N et T2 N ne sont pas significativement différentes. De plus, la puissance de ce test est bonne puisqu'on avait 66% de mettre en évidence une différence de 10%. On ne peut donc pas conclure d'un retard dans le développement du bananier.

Synthèse sur l'effet de l'introduction d'un couvert végétal en bananeraie établie :

On observe un **retard de croissance** en bananeraie établie (-5cm de circonférence) explicable par la **compétition pour les ressources en azote** entre la plante de couverture et le bananier. Cependant, cette différence est relativement modeste et probablement compensable par une bonne gestion de la fertilisation. Le modèle SIMBA-IC sera utile au prototypage de ce type de système de culture et nous permettra d'avoir une idée de la gestion de la fertilisation à adopter.

2. Pendant la phase d'installation (1er cycle)

a) Mise en évidence d'un déficit de croissance et d'un retard dans le développement

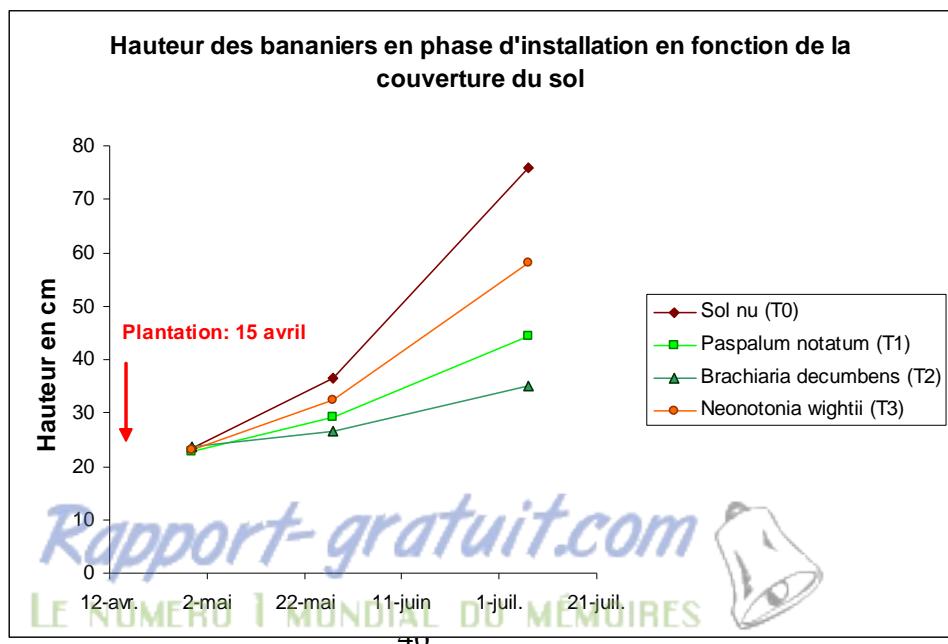


Figure 29 Hauteur des bananiers sur bananeraie en phase d'installation

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	T0	75,877	A		
4.0	T3	58,123		B	
2.0	T1	44,368			C
3.0	T2	35,095			C

Tableau 9Anova sur la hauteur des bananiers au 7 juillet, sur bananeraie en phase d'installation: effet significatif de l'association

On observe une différence de croissance (indicateur : hauteur) significative entre les parcelles sur sol nu et celle enherbées (Tableau 9). Néanmoins, il semble que la concurrence induite par le couvert de légumineuse (T3) soit inférieure à celle induite par les couverts de graminées (T1 et T2). Il est possible d'émettre plusieurs hypothèses quant à ce résultat :

- T3 (*Neonotonia wightii*) étant une légumineuse, elle fixe l'azote atmosphérique et entre donc moins en compétition pour cette ressource avec le bananier
- T3 produit moins de biomasse que les 2 autres couverts (T1 et T2)

La première hypothèse peut être écartée puisque nous avons pu observer dans nos essais que malgré l'inoculation de la bactérie fixatrice, *Neonotonia wightii* ne fixait pas l'azote atmosphérique (pas de présence de nodule rouge). Quant à la deuxième hypothèse, nous ne pouvons la vérifier puisque nous n'avons pas fait de mesure de biomasse sur T3. En revanche, à vue d'œil nous pouvons estimer que la production de biomasse a été moindre. En outre, le couvert sur T3 semblait plus pur et moins envahi par les adventices que les parcelles T1 et T2, et ce probablement en raison d'un effet allelopathique dépressif de *Neonotonia wightii* sur la croissance des adventices.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	T0	13,859	A		
4.0	T3	12,517		B	
2.0	T1	10,738			C
3.0	T2	9,084			D

Tableau 10 Anova sur le nombre de feuilles émises des bananiers au 7 juillet, sur bananeraie en phase d'installation: effet significatif de l'association

On observe également un retard de développement (d'1feuille pour T3, de 3 feuilles pour T1 et de 4 feuilles pour T2), Tableau 10 .

Nous allons dans le paragraphe suivant, **discuter de l'origine de la compétition** entre le bananier et la plante de couverture.

b) Concurrence pour quelle(s) ressources ?

i Concurrence pour l'azote

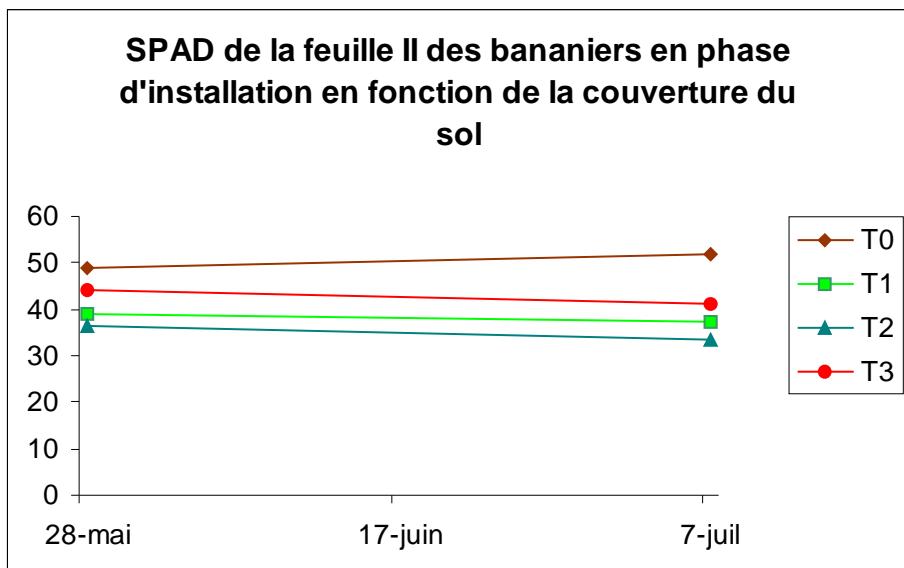


Figure 30 Evolution du SPAD des bananiers sur différentes couvertures du sol

Les tests statistiques effectués sur le SPAD au 7 juillet montrent qu'il est significativement inférieur sur les parcelles enherbées (T0>T3>T1>T2) et donc **qu'il existe une compétition pour l'azote**. Ces résultats sont cohérents avec le classement des effets dépressifs sur la croissance (Figure 29). Cependant nous ne pouvons quantifier ces effets puisque contrairement à l'étude en bananeraie établie, nous n'avons pas à faire à un couvert fermé, la courbe de dilution n'est donc plus valide, et on ne peut donc pas utiliser la méthode de l'INN.

Indicateur teneur en azote du sol :

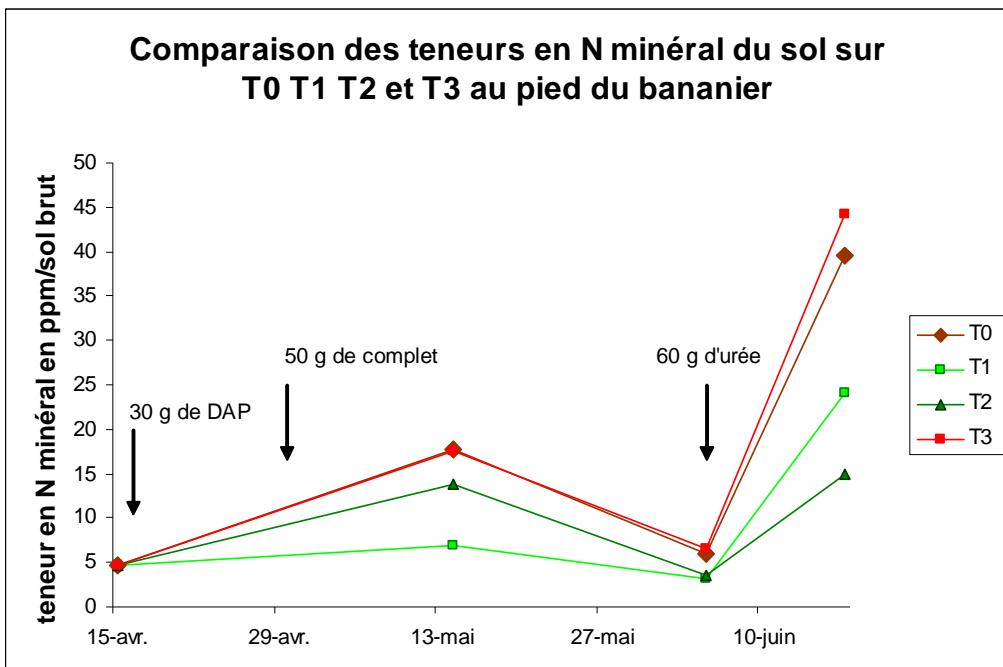


Figure 31 Dynamique de l'azote minéral du sol en phase d'installation: comparaison sur sol nu et enherbé

L'association d'une couverture végétale vivante en bananeraie a un effet sur les teneurs en azote minéral du sol, et en conséquence sur l'azote biodisponible pour le bananier :

- Globalement, T0 et T3 suivent la même dynamique, mais semblent être en situation limitante juste avant les fertilisations.
- On observe une forte réduction de l'azote minéral du sol sous le couvert T1 et T2 qui semblent être plus souvent en condition limitante : ces résultats vont dans le sens d'une compétition pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier, et sont cohérents avec les résultats obtenus sur le SPAD.

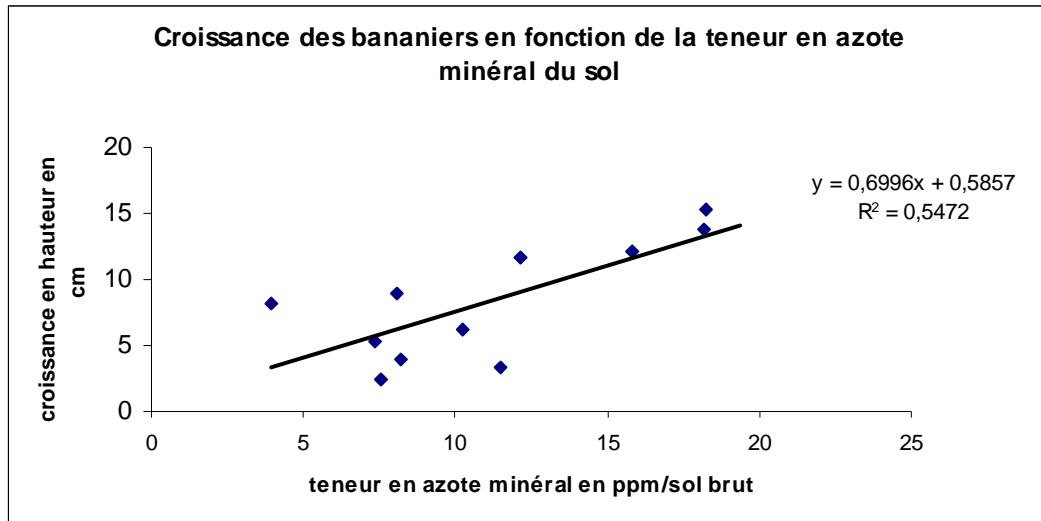


Figure 32 courbe de réponse de croissance en fonction de la teneur en N minéral du sol

D'après la Figure 32, on peut observer une corrélation entre la teneur en azote du sol et la croissance en hauteur des bananiers. On peut donc conclure que la compétition pour l'azote à un rôle important sur la croissance des bananiers.

ii Concurrence pour la lumière

Une photo du dispositif expérimental (Figure 33) montre bien que même lorsque les bananiers sont petits et que la plante de couverture est très productive (i.e Brachiaria decumbens), la concurrence pour la lumière est faible. On peut donc la considérer comme négligeable.



Figure 33 Bananeraie enherbée (T2 = Brachiaria decumbens) en 1er cycle, 1 mois après plantation

iii Concurrence pour les autres éléments minéraux

Les teneurs initiales du sol se situent dans la fourchette des valeurs préconisées, voire Annexe 4. En outre, le 30 avril et le 6 juin on a mis 65g de complet par bananier donc les ressources en P, K et Mg ne sont pas limitantes.

iv Température

On observe une différence de température de -1°C sur T3 et de -1/2 °C sur T1 et T2 par rapport à T0 :

- Moyenne sur T0 à 10 cm : 27,52 °C
- Moyenne sur T1 à 10 cm : 27,05 °C
- Moyenne sur T2 à 10 cm: 27,05 °C
- Moyenne sur T3 à 10 cm: 26,57 °C

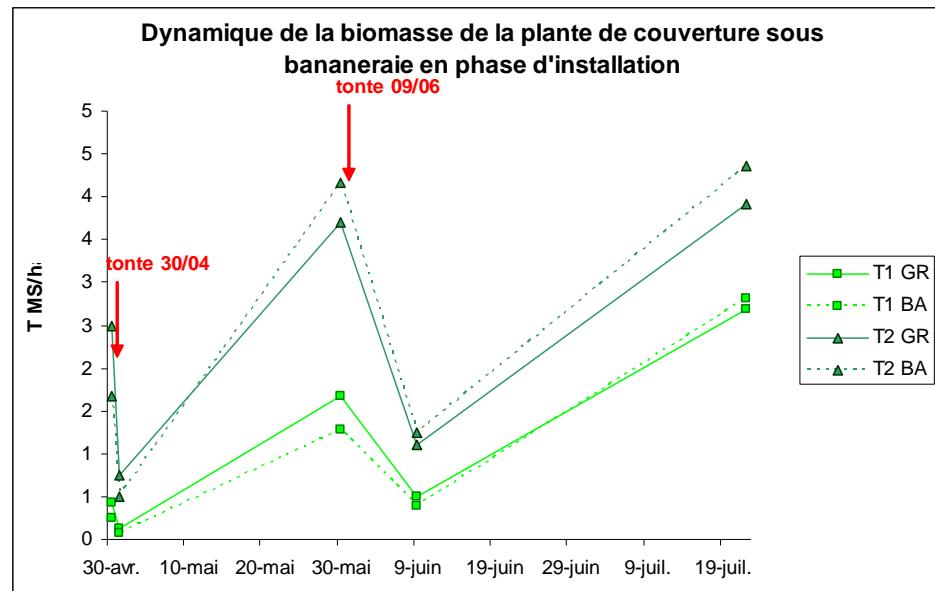
F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	T0	13,859	A			
4.0	T3	12,517		B		
2.0	T1	10,738			C	
3.0	T2	9,084				D

Tableau 11 Anova sur le nombre de feuilles émises des bananiers au 7 juillet, sur bananeraie en phase d'installation: effet significatif de l'association

Il faut environ une semaine au bananier pour émettre une feuille. Cela correspond pour une base de 27 °C en moyenne par jour et un zéro de végétation de 14 °C chez le bananier, à environ **90 °C.jours**. La différence de température, même de 1 °C sur trois mois (i.e 90 °C.jours), ne peut expliquer qu'une différence de 1 feuille émise en moins.

- Or sur T3, la différence est d'environ 1 feuille émise : la différence de 1°C expliquerait donc entièrement le retard de croissance. Ces résultats sont cohérents avec les teneurs en azote du sol qui sont les mêmes sur T0 et T3 (Figure 31). On n'aurait donc pas de compétition pour l'azote, mais uniquement un retard de croissance en raison de plus faibles températures sur les parcelles enherbées.
- Sur T1 et T2, la différence de 0,5°C n'explique qu'une part relativement négligeable du retard de croissance. On peut donc supposer que ce retard est surtout la conséquence d'une compétition pour l'azote démontrée dans le paragraphe précédent.

v Autres causes possibles



Sur T1, alors que la biomasse produite par Paspalum notatum n'est pas aussi importante que sur T2 (Figure 34), le déficit de croissance est similaire (Tableau 9). Il est possible d'émettre plusieurs hypothèses quant à ce résultat :

- Le dispositif mis en place et les tests statistiques ne sont pas assez puissants pour différencier le déficit de croissance sur T1 (- 32 cm en hauteur) et sur T2 (- 41 cm en hauteur).
- Paspalum notatum a peut être un **effet allélopathique dépressif** sur la croissance du bananier. Cette voie est à ne pas négliger même si la concurrence nutrition azotée démontrée est très importante.
- La biomasse mesurée ne représente que la partie aérienne. Paspalum notatum a probablement une **biomasse racinaire importante** qui n'a pas été prise en compte et qui pourrait être la cause de ce fort déficit.

Bilan :

On observe un déficit de croissance très important en bananeraie en phase d'installation avec un couvert de graminée (effet sur la hauteur des bananiers : -32 cm sur T1 et -41 cm sur T2)
en raison de:

- La compétition pour l'azote très importante au pied du bananier
- La température a probablement un effet, mais seulement partiel

B. Etude spatialisée du fonctionnement azoté de la bananeraie enherbée

Une des hypothèses de départ était l'augmentation de la variabilité spatiale lors de l'implantation d'un couvert végétal vivant en bananeraie. D'après les résultats obtenus, nous allons voir que cette hypothèse peut être validée.

1. Un fonctionnement de la plante de couverture spatialisé

a) En bananeraie en phase d'installation



Figure 35 Bananeraie enherbée (*Brachiaria decumbens*) en 1er cycle

En observant la Figure 35, on remarque une différence de couleur de la plante de couverture, avec une zone bien verte au pied du bananier, et une zone jaunâtre dans le grand rang, en général signe d'une carence en azote.

La localisation a un effet significatif sur la teneur en azote de la plante de couverture (Tableau 12), puisqu'au pied du bananier, la teneur moyenne est de 2,89 % d'azote, alors qu'elle n'est que de 2,34 % dans le grand rang. Ce résultat s'explique par un **apport d'engrais localisé au pied du bananier**.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0	Au pied du bananier	2,89	A	
1.0	Dans le grand rang	2,34		B

Tableau 12 Anova sur la teneur en azote de la plante de couverture en bananeraie en phase d'installation au 30 avril: effet significatif de la localisation

Quant à la dynamique de la production de biomasse de la plante de couverture (Figure 34), les tests statistiques indiquent qu'elle est la même au pied du bananier et dans le grand rang, sauf à la plantation, où la différence est significative. Ces résultats sont cohérents puisque l'ombrage du bananier est encore très faible lors du 1^{er} cycle, donc la production de biomasse est la même au pied du bananier et dans le grand rang. La différence observée à la plantation est probablement due à l'arrachage de la plante de couverture au niveau du pied du bananier lors de la plantation des vitroplants.

b) En bananeraie établie

Avant toute chose, le fonctionnement de la plante de couverture en bananeraie établie est modifié par rapport à celui observé en 1^{er} cycle puisque l'enherbement est alors localisé dans le grand rang et au pied du bananier. En effet, les résidus de bananiers des cycles précédents constituent un paillage dans le petit rang, empêchant ainsi la plante de couverture de se développer.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0	BA	2,22	A	
1.0	GR	1,43		B

Tableau 13 Anova sur la teneur en azote de la plante de couverture en bananeraie établie au 28 avril (couvert de trois mois): effet significatif de la localisation

Concernant la teneur en azote de la plante de couverture, on n'observe pas de différence significative entre T1 et T2. Cela corrobore l'hypothèse selon laquelle le couvert végétal sur T1 et sur T2, bien que différent à l'implantation (respectivement Cynodon dactylon et Brachiaria decumbens) a évolué, en bananeraie établie, vers une seule et même couverture spontanée, mélange de cinq espèces. En revanche, **la localisation a un effet significatif sur la teneur en azote** de la plante de couverture (Tableau 13), puisqu'au pied du bananier, la teneur moyenne est de 2,22 % d'azote, alors qu'elle n'est que de 1,43 % dans le grand rang. En outre, en passant à l'INN (Figure 36), on observe bien qu'au pied du bananier, la plante de couverture est quasiment au potentiel (INN de 0,9), alors que dans le grand rang, elle est en stress azoté (INN de 0,6). Ce résultat s'explique par un apport d'engrais localisé au pied du bananier.

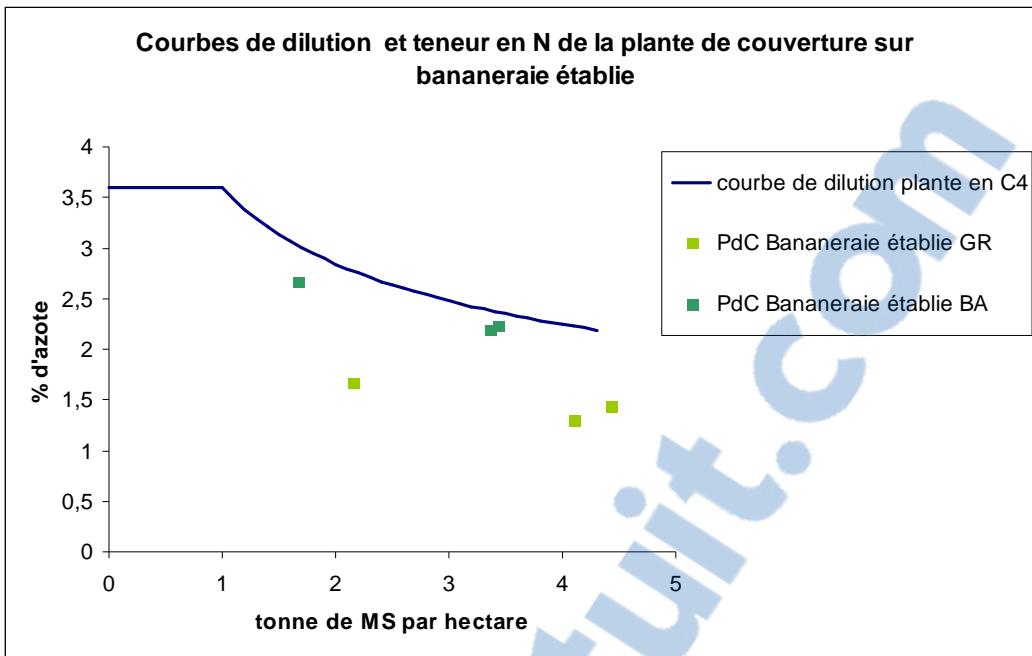


Figure 36 Situation de la nutrition azotée de la plante de couverture en bananeraie établie, au pied du bananier et dans le grand rang

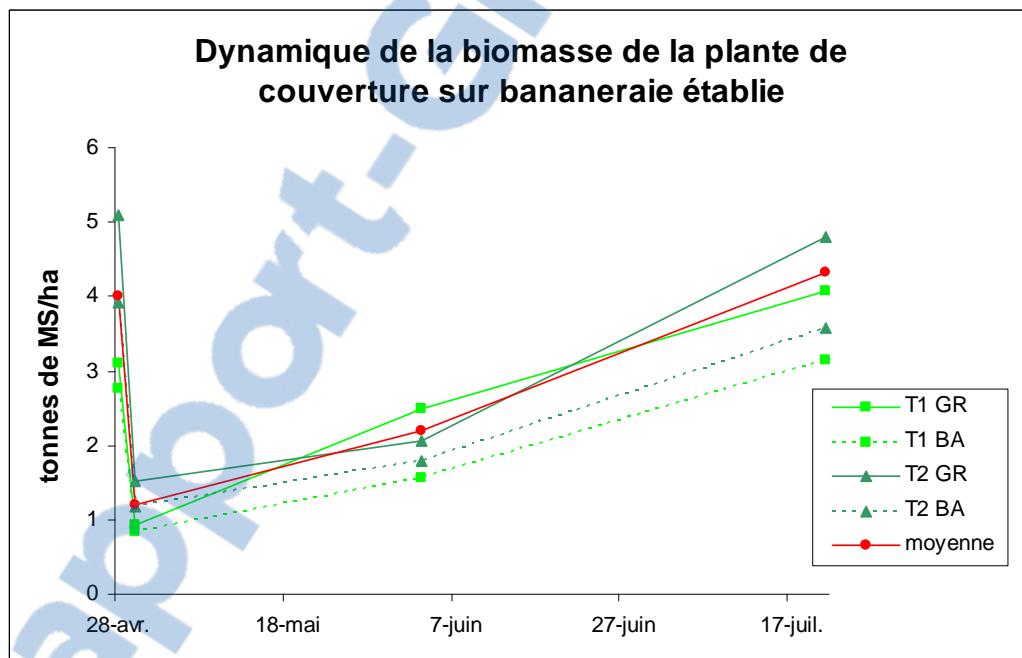


Figure 37 Dynamique de la biomasse de la plante de couverture sur bananeraie établie

D'après la Figure 37, la production de biomasse semble plus importante dans le grand rang qu'au pied du bananier. Ce résultat est cohérent avec un ombrage plus important au pied du bananier que dans le grand rang.

Cependant, les tests statistiques effectués sur la biomasse produite par la plante de couverture indiquent qu'il n'y a pas d'effet significatif de la localisation. La puissance du test étant assez mauvaise (14%), on peut penser que l'essai n'était pas assez puissant pour montrer cette différence.

En outre, les tests effectués pour comparer la production de biomasse sur T1 et T2 indiquent qu'il n'y a pas de différence significative, ce qui va, une fois encore dans le sens d'un couvert que l'on peut considérer comme identique.

2. Une dynamique de l'azote dans le sol spatialisée

La dynamique de l'azote dans le sol est différente selon les zones considérées (Figure 38) :

- dans le grand rang, la teneur en azote est faible (aux alentours de 5 ppm de sol brut) et constante
- au pied du bananier (où la fertilisation est effectuée) la teneur en azote varie en rapport avec la fertilisation apportée
- dans le petit rang, la teneur en azote est plus élevée que dans le grand rang (aux alentours de 40 ppm de sol brut), en raison de la dégradation des résidus de bananiers, mais elle diminue lors de la dernière mesure, montrant ainsi une probable consommation de cet azote par le bananier.

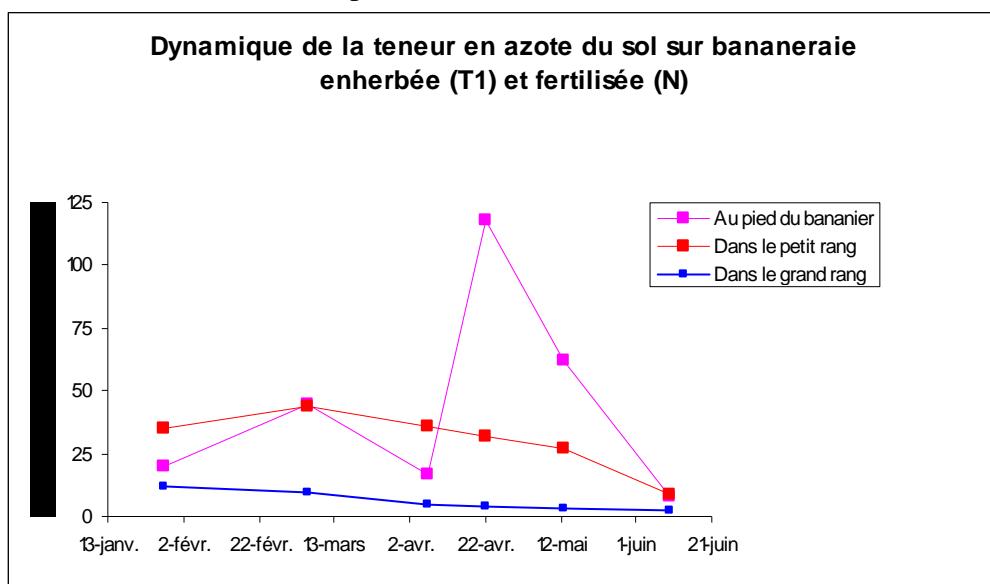


Figure 38 Dynamique de la teneur en azote du sol sur bananeraie établie enherbée et fertilisée

Bilan de la partie IV.B : validation de l'hypothèse d'une **approche spatialisée** en bananeraie enherbée

- la **dynamique d'azote** dans le **sol** varie selon les zones considérées
- la **biomasse** produite par la plante de couverture est différente selon la zone observée (BA et GR)
- la **teneur en azote** de la plante de couverture est variable selon la zone étudiée (BA et GR)

Ces conclusions sont valables pour la bananeraie établie et pour la bananeraie en phase d'installation.

V. Approche de modélisation

A. Calibration du modèle

Dans cette partie, nous allons, à partir des résultats expérimentaux obtenus, calibrer certains des paramètres nécessaires au modèle SIMBA-IC. Ils sont récapitulés dans le Tableau 14.

Nous avons vu dans la partie IV qu'il est raisonnable de considérer T1 et T2 sur bananeraie établie comme ayant évolué vers un même couvert spontané. En effet, sur T1 et T2 on observe :

- Un mélange de 5 espèces en proportions similaires
- Un effet de l'introduction du couvert sur la croissance du bananier identique
- Une production de biomasse similaire
- Une teneur en azote du couvert similaire

Nous pouvons ainsi utiliser indifféremment les données sur T1 et sur T2 pour paramétriser de façon plus précise le module croissance de la plante de couverture du modèle SIMBA-IC.

1. Calibration de la croissance en biomasse de la plante de couverture

La croissance de la plante de couverture suit une courbe logistique. Le nombre insuffisant de mesures de croissance n'a pas permis de bien calibrer le démarrage et la pente de cette courbe. Pour le modèle, des valeurs trouvées dans la bibliographie ont été utilisées. En revanche, la **biomasse maximale** produite a pu être mesurée : 4 tonnes de MS/ha.

2. LAI de la plante de couverture

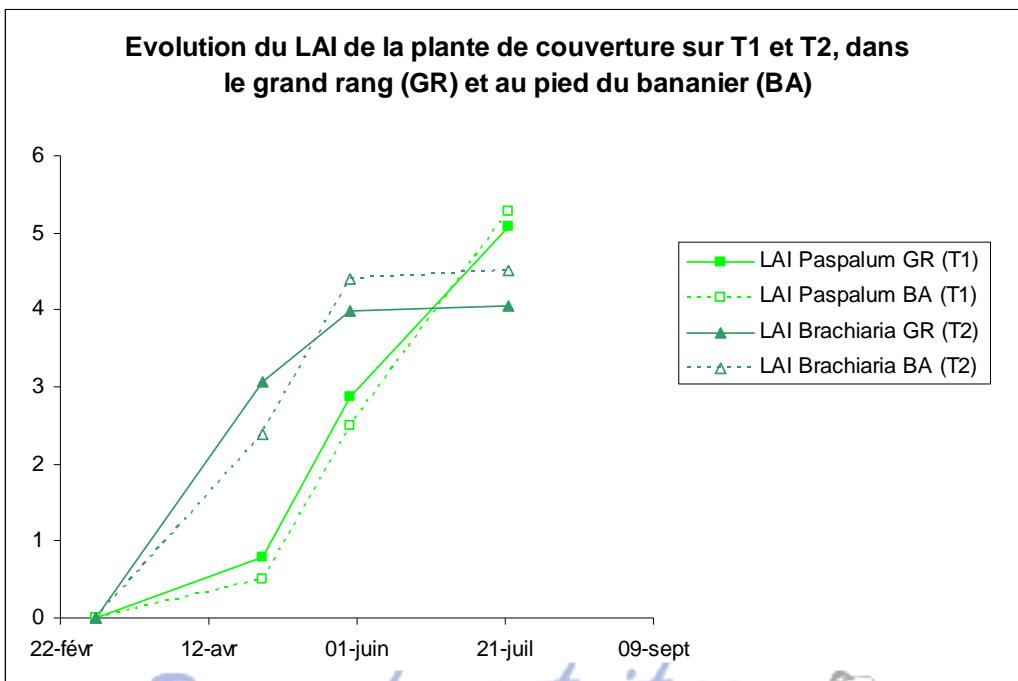


Figure 39 Evolution du LAI de la plante de couverture sur bananeraie en phase d'installation

Le LAI sur bananeraie établie est le LAI du mélange des 5 espèces présentes sur T1 et sur T2.

3. Le coefficient d'extinction pour la plante de couverture

Ce paramètre a été trouvé dans la notice de STICS (Brisson et al., 1998).

4. Le pourcentage d'azote de la plante de couverture au pied du bananier et dans le grand rang

Ce paramètre a été mesuré sur bananeraie en phase d'installation et sur bananeraie établie. On estimera que sur bananeraie établie, la teneur en azote est constante, bien qu'après chaque coupe, la teneur en azote augmente un peu du fait de la dilution de l'azote. Sur bananeraie en phase d'installation, nous avons pu obtenir plusieurs valeurs de la teneur en azote : au démarrage (teneur en azote plus élevée) et un mois et demi après le semis.

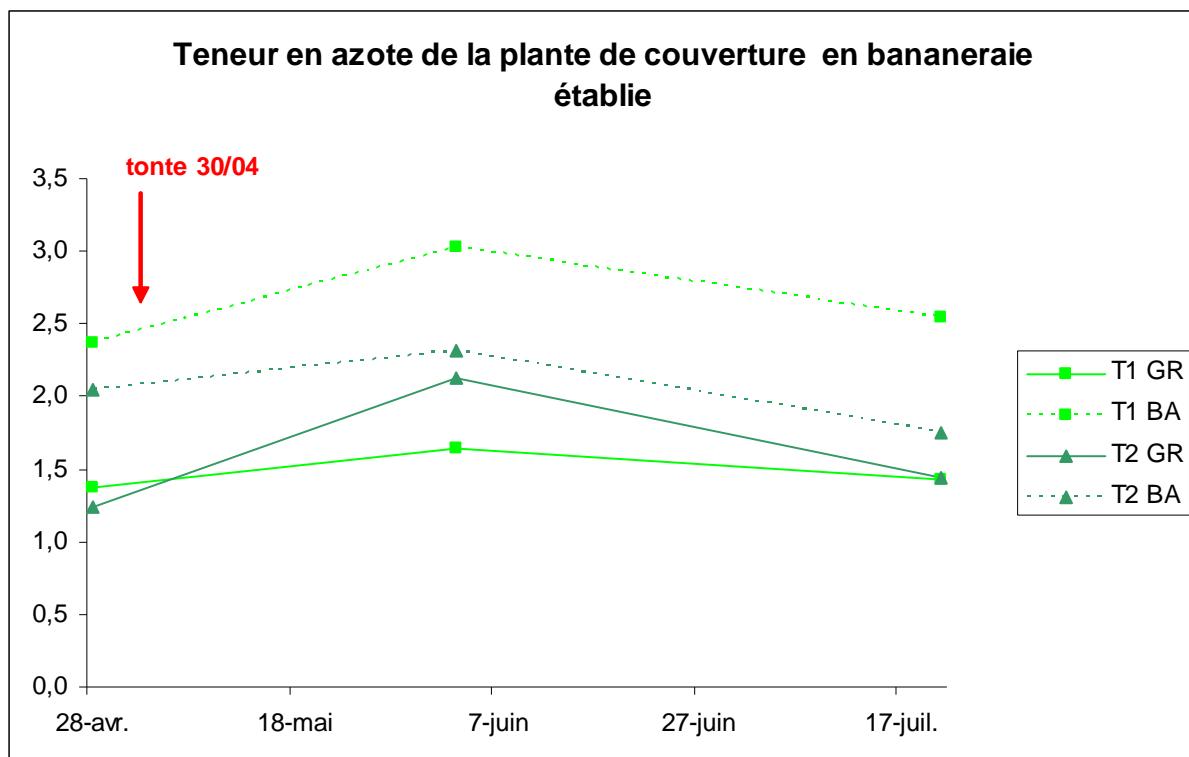


Figure 40 Teneur en azote de la plante de couverture en bananeraie établie

5. Le stock d'humus initial

Le stock en humus initial est calculé de la manière suivante :

$$S_{\text{humus initial } 0-30 \text{ cm}} = [(\%N_{0-20 \text{ cm}} \times Da \times E_{0-20 \text{ cm}}) + \frac{(\%N_{20-40 \text{ cm}} \times Da \times E_{20-40 \text{ cm}})}{2}] \times 1000$$

Avec :

$S_{\text{humus initial } 0-30 \text{ cm}}$: Stock d'humus initial en Kg d'azote par hectare sur l'horizon 0-30 cm

$\%N_{0-20 \text{ cm}}$: teneur en azote organique de l'horizon 0-20 cm en g % g de sol sec (=0.15)

$\%N_{20-40 \text{ cm}}$: teneur en azote organique de l'horizon 20-40 cm en g % g de sol sec (=0.13)

Da : densité apparente du sol en g/cm³ (=1.05) : c'est le rapport du poids de sol sec (en g) sur le volume total de l'échantillon

E_{0-20 cm} : épaisseur de l'horizon 0-20 en cm

E_{20-40 cm} : épaisseur de l'horizon 20-40 en cm

Pour des raisons de cohérence avec les mesures de teneurs en azote minéral du sol qui sont effectuées sur 0-30 cm, le stock d'humus du sol est calculé sur l'horizon 0-30.

On obtient donc un **stock d'humus initial de 4515 kg d'azote par hectare**.

6. La minéralisation de la matière organique

Les données utilisées sont celles des résultats de la minéralisation de la matière organique d'un sol brun rouille à halloysite en pot avec une épaisseur de 20 cm sur 2 mois (Marc Dorel, communications personnelles).

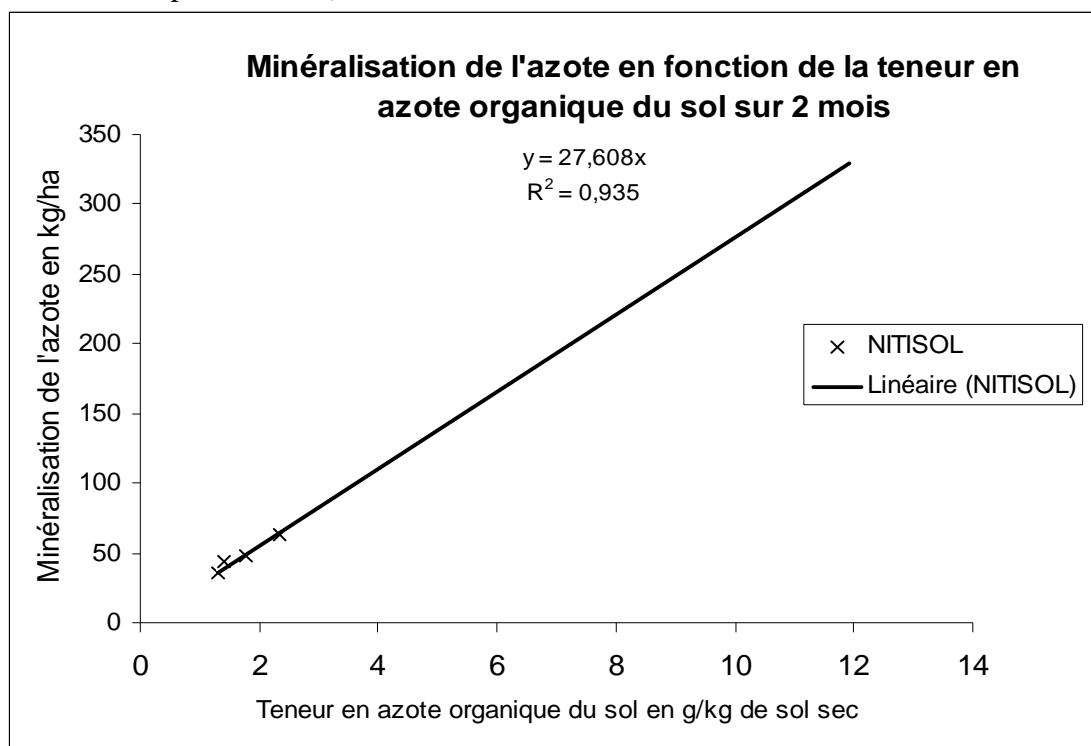


Figure 41 Minéralisation de la MOS sur une période de 2 mois selon la teneur en N organique du sol

Le pas de temps du modèle étant la semaine, il faut ramener cette valeur de minéralisation mesurée sur 2 mois à 1 semaine. En outre, la minéralisation de la matière organique du sol a été mesurée sur un échantillon de sol de 20 cm. Afin d'être cohérent avec les autres valeurs utilisées, il est nécessaire de ramener la minéralisation de la matière organique à une épaisseur de sol de 30 cm.

$$MOS_{\text{semaine } 0-30} = \left[(MOS_{2 \text{ mois}} \times \%N_{0-20 \text{ cm}}) + \frac{(MOS_{2 \text{ mois}} \times \%N_{20-40 \text{ cm}})}{2} \right] \times \frac{10}{9}$$

Avec :

MOS_{semaine 0-30}: minéralisation de la matière organique du sol en kg/ha pendant 1 semaine sur l'horizon 0-30

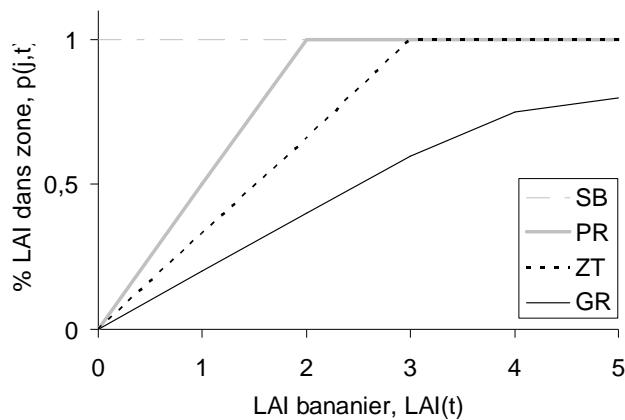
MOS_{2 mois}: minéralisation de la matière organique du sol en kg/ha pendant 2 mois sur 20 cm

%N_{0-20 cm}: teneur en azote organique de l'horizon 0-20 cm en g % g sur sol sec (=0.15)

%N_{20-40 cm}: teneur en azote organique de l'horizon 20-40 cm en g % g sur sol sec (=0.13)

On obtient une minéralisation de la matière organique du sol sur 0-30 cm de 6.6 kg d'azote par hectare et par semaine.

7. Le pourcentage de LAI du bananier et d'exploration des racines dans chacune des zones



Dans chaque zone, le LAI du bananier augmente avec le temps et atteint une valeur maximale. Le % de LAI dans une zone représente en fait le pourcentage d'ombrage fait par le bananier à la plante de couverture :

- sous le bananier, l'ombrage est toujours total
- dans le petit rang, l'ombrage est total à partir d'un LAI de 2
- dans la zone de transition, l'ombrage est total à partir d'un LAI de 3
- dans le grand rang, l'ombrage n'est jamais total. Il atteint 80% au maximum.

Le pourcentage de LAI du bananier dans chaque zone suit la même évolution que l'exploration du sol par les racines du bananier, (Tixier, communication personnelle).

8. Coefficients de concentration des précipitations dans certaines zones (stemflow et throughflow)

Les zones importantes à calibrer en terme de pluie incidente sont dans le petit rang et au pied du bananier. En effet, ce sont les zones où on a de grosses quantités d'N minéral susceptibles d'être lessivées en raison de l'engrais minéral apporté au pied du bananier et de la minéralisation des résidus de bananiers dans le petit rang.

La concentration de la pluie au pied du bananier est plus importante : ce coefficient évolue en fonction du LAI du bananier. Au LAI maximal, il est égal à 1,5 au pied du bananier. (Thieuleux, 2006).

Paramètres sol brun rouille à halloysite	Valeurs	Sources
minéralisation MOS (kg/ha) pour 1 semaine 0-30cm	6,6	Marc Dorel, communication personnelle
stock humus total 0-30 cm	4515	mesuré

Paramètres plante de couverture bananeraie établie	Valeurs	Sources
LAI	3,46	mesuré et observé
K coefficient d'extinction graminée	0,55	bibliographie: notice de STICS
% N GR	1,37	mesuré
% N BA	2,22	mesuré

Paramètres plante de couverture bananeraie 1er cycle	Valeurs	Sources
LAI Paspalum GR (T1)	0,79	mesuré
LAI Paspalum BA (T1)	0,51	mesuré
LAI Brachiaria GR (T2)	3,07	mesuré
LAI Brachiaria BA (T2)	2,38	mesuré
K coefficient d'extinction	0,55	bibliographie: notice de STICS
% N GR T1	2,5	mesuré
% N BA T1	3,16	mesuré
% N GR T2	2,18	mesuré
% N BA T2	2,61	mesuré

Tableau 14 Paramètres calibrés pour le modèle SIMBA-IC

B. Validation du modèle

En observant les sorties du modèle concernant la biomasse produite par le bananier en condition de fertilisation N (23g d'N tous les 2 mois), avec et sans enherbement, on retrouve bien le fonctionnement observé et discuté dans la partie IV (Figure 42): en bananeraie enherbée, on observe une forte concurrence en phase d'installation et une faible concurrence en bananeraie établie, qui se traduit par une diminution de la biomasse produite. Les simulations nous donnent une différence de 1,6 kg de matière sèche par bananier en 1^{er} cycle et de 1,2 kg par bananier en 2^{ème} cycle.

Cependant, ces sorties du modèle n'ont pu être comparées avec les données observées. En effet, les données de sorties concernent la biomasse sèche aérienne et racinaire, or nous avons des données observées uniquement sur la biomasse sèche aérienne (relation entre biomasse sèche aérienne du rejet et circonférence).

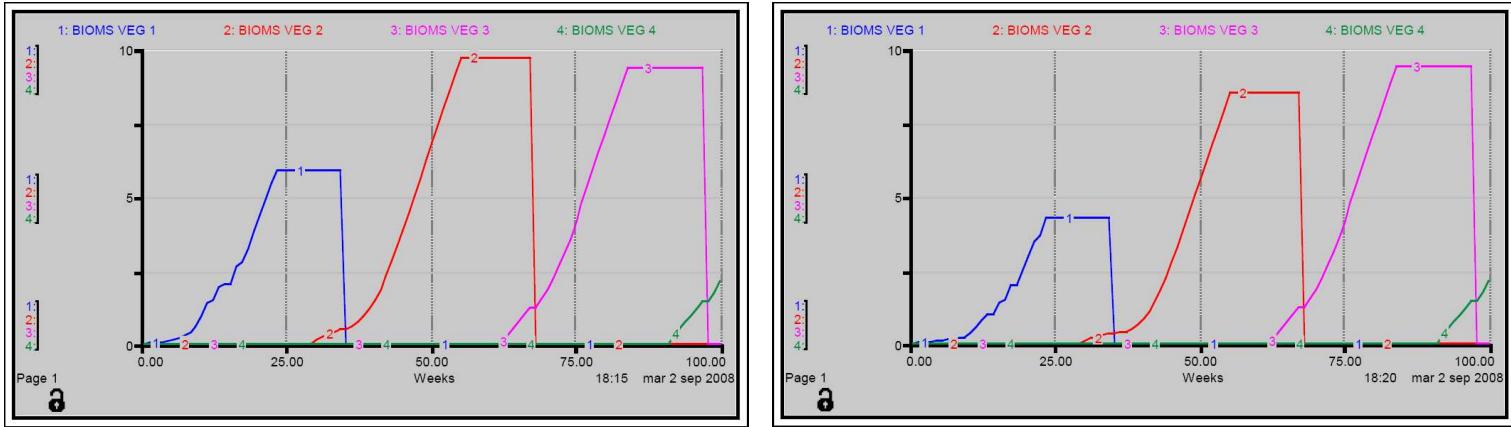


Figure 42 Simulation de la croissance des bananiers sur sol nu (à gauche) et enherbé (à droite) ; fertilisation 23g d'N/pieds/2 mois ; parcelles enherbées désherbage tous les 3 mois

Le modèle représente bien, d'un point de vue qualitatif, la compétition pour l'azote qui a lieu entre le bananier et la plante de couverture, principalement au 1^{er} cycle. D'un point de vue quantitatif, ces simulations sont à valider en les comparant avec les données observées.

Le paramétrage de la minéralisation de l'humus du sol a été fait avec des données communiquées par Marc Dorel sur la mesure de la minéralisation nette en pot sur sol brun rouille à Halloycite. Cependant, les sorties ainsi obtenues de la dynamique de l'azote du sol ne correspondent pas à ce que l'on observe au champ. En effet, les sorties du modèle (Figure 43) montrent une accumulation de l'azote minéral dans les quatre zones à partir du deuxième cycle. Afin d'obtenir des sorties cohérentes avec la réalité (Figure 38) nous avons ajusté la minéralisation de la matière organique du sol en la divisant par 2.

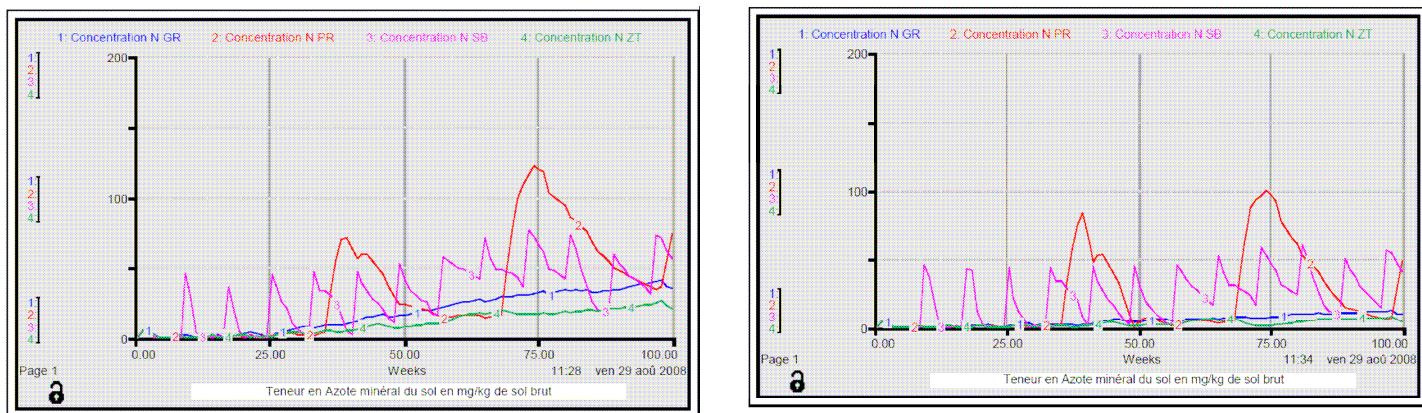


Figure 43 Dynamique de la teneur en azote minéral du sol simulée avec la minéralisation mesurée par M.Dorel (à gauche) et ajustée (à droite)

Pour expliquer cette différence entre les teneurs en azote minéral du sol observées et simulées, on peut émettre plusieurs hypothèses :

- La minéralisation de l'humus du sol est mal estimée. C'est probablement le cas puisque les mesures ont été faites en pot et non in situ.
- Le modèle ne prend pas en compte l'organisation microbienne (on considère le compartiment microbien invariant), alors qu'il peut présenter des pics de mobilisation de l'azote minéral, notamment lors de fertilisation minérale.
- Après 4 cycles de production, on observe un enrichissement du sol en matière organique. (les teneurs passent de 0,13 % d'azote organique à la plantation à 0,165 % au milieu du 4^{ème} cycle)). Or le modèle ne simule pas une augmentation du compartiment humus. Cette immobilisation d'azote qui n'est pas prise en compte dans le modèle pourrait expliquer en partie pourquoi on n'observe pas d'accumulation d'azote minéral en réalité.

C. Exploration par le modèle des scénarii de gestion de la plante de couverture et de la fertilisation

En explorant différents scénarii de gestion de la fertilisation, et en restant sur la base d'une fréquence de fertilisation tous les deux mois, pour atteindre un niveau de production (indicateur : biomasse sèche) identique à celui d'une bananeraie enherbée fertilisée tous les 2 mois à 23 gN/bananier (cela équivaut à 200 unités d'azote par hectare et par cycle) Figure 44, deux gestions sont possibles :

- fertilisation tous les deux mois à 75 gN/bananier (cela équivaut à près de 700 unités d'azote par hectare) pendant le 1^{er} cycle et ensuite fertilisation à 30 gN/ bananier, Figure 45.
- fertilisation tous les deux mois à 35 gN/bananier (cela équivaut à près de 260 unités d'azote par hectare et par cycle) + désherbage au pied du bananier (limite la compétition azotée entre plante de couverture et bananier qui est la plus forte à cet endroit) et dans le petit rang (pour désherber dans cette zone trop étroite où le tracteur ne passe pas, il faut utiliser un gyrobroyeur, ce qui est assez contraignant pour l'agriculteur. Donc autant profiter du désherbage du pied du bananier pour également désherber le petit rang) en 1 er cycle tous les deux mois et ensuite fertilisation à 30 gN/bananier, Figure 46.

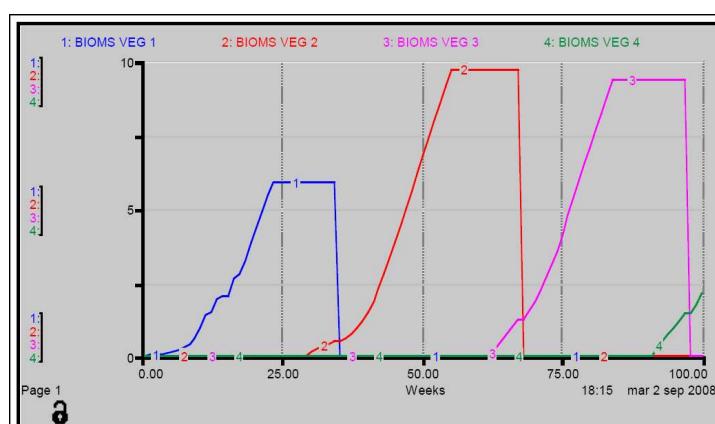


Figure 44 Biomasse en kgMS/bananier : Bananeraie sur sol nu, fertilisation 23gN/pied/2 mois

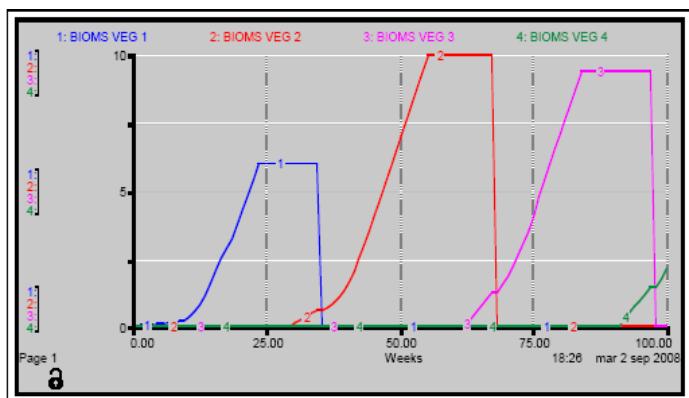


Figure 45 Biomasse en kgMS/bananier : Bananeraie enherbée, fertilisation 75Ng/pied/2 mois

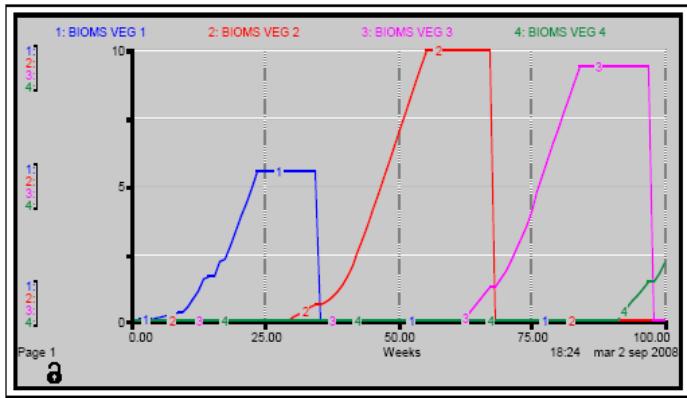


Figure 46 Biomasse en kgMS/bananier : Bananeraie enherbée, desherbée au pied du bananier en 1er cycle, fertilisation 35gN/pied/2 mois

Etant donné le coût de la fertilisation azotée, il paraît évident que le premier scénario n'est pas économiquement supportable, sans parler des risques de lessivage important. En outre il paraît absurde de « fertiliser » la plante de couverture.

Le deuxième scénario semble plus acceptable environnementalement et économiquement. De plus, l'économie d'herbicide reste très élevée : 95 % sur les 4 cycles (80 % sur le 1^{er} cycle et 100 % sur les cycles suivants).

Les scenarii obtenus en utilisant le modèle semblent cohérents. Malgré un paramétrage plus précis et une validation du modèle qui devront être faits par la suite, il semble que le modèle SIMBA-IC puisse être utilisé pour le **prototypage de système de culture de bananeraies enherbées**.

VI. Discussion et perspectives

A. Discussion

1. Discussion des hypothèses de départ

Rappel des hypothèses de travail :

Hypothèse 1 : *Il existe une concurrence pour l'azote entre la plante de couverture et la bananeraie en phase d'installation. En bananeraie établie, en condition de fertilisation non limitante et de coupes régulières, la concurrence du couvert de graminée est tolérable.*

Hypothèse 2 : *la structure du couvert ainsi que le dispositif de plantation induit une hétérogénéité spatiale en bananeraie, accentuée par l'introduction d'une plante de couverture.*

Il existe effectivement une concurrence très forte pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier en phase d'installation. Cependant, l'exploration par le modèle SIMBA-IC des différentes gestions possibles de la fertilisation semble nous indiquer qu'en désherbant manuellement au pied du bananier lors du premier cycle, lorsque la concurrence est la plus forte, et en augmentant légèrement la dose de fertilisation, on arrive à compenser l'effet de la compétition azotée sur la production de biomasse du bananier.

Quant aux résultats en bananeraie établie, on observe un léger déficit de croissance en raison d'une compétition pour l'azote. Cependant, ces résultats sont à relativiser compte tenu de l'état actuel des préconisations en matière de fertilisation. En effet, dans le dispositif de fertilisation non limitante, nous avons fertilisé à une fréquence de 23g d'N par pied tous les 2 mois. Or cela représente un apport de près de 200 UN/ha. On est donc bien loin des 400 UN/ha préconisés. Si l'on avait appliqué cette fertilisation, on n'aurait probablement pas observé de concurrence sur bananeraie établie.

Nous avons vu que d'une part le fonctionnement de la plante de couverture était spatialisé, avec une distinction entre le grand rang et le petit rang. D'autre part, le fonctionnement azoté du sol peut être délimité en trois zones : petit rang, grand rang et au pied du bananier. Ces résultats permettent de confirmer la nécessité d'une **approche spatialisée** du fonctionnement azoté de la bananeraie enherbée durant la phase d'installation mais également lorsqu'elle est établie.

2. Discussion sur le type de plante de couverture à adopter

Les essais de la bananeraie en phase d'implantation n'ont pas permis de sélectionner une **graminée** répondant aux critères prédéfinis. En effet, la concurrence induite par Paspalum notatum (T1) et Brachiaria decumbens (T2) sur la croissance des bananiers est conséquente. Il sera donc nécessaire de sélectionner d'autres graminées, produisant une biomasse plus faible et de s'assurer qu'elles répondent également aux autres critères. Le travail de caractérisation de certaines graminées et légumineuses effectué au CIRAD Martinique devrait être utile pour déterminer quels couverts étudier.

Quant à l'essai avec un couvert de **légumineuse** (T3 : *Neonotonia wightii*), il apparaît plus intéressant que ce que nous avions imaginé. En effet, malgré une implantation difficile et la nécessité d'un désherbage manuel, le couvert s'est bien développé, il se maintient bien, ne fait pas trop de biomasse et ne concurrence donc pas trop le bananier. En outre, il est pur, probablement en raison d'un effet allélopathique dépressif sur la croissance des graminées, et n'est pas hôte des nématodes du bananier. En revanche, malgré l'inoculation, en même temps que le semis, de la bactérie nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique il ne fixe pas l'azote. La mise en place de la fixation est inhibée par les fortes teneurs en azote minéral dans la zone de présence des nodosités. L'offre en azote minérale du sol était probablement trop importante, en particulier dans la zone de fertilisation, au pied du bananier. Enfin, l'entretien d'un couvert de légumineuse se révèle plus gérable à grande échelle que prévu. En effet, il semble qu'il soit possible d'entretenir le couvert au gyrobroyeur (M.Dorel, communication personnelle), ce qui laisse penser que ce type de couvert serait généralisable à l'échelle des grandes parcelles présentes en Martinique. En outre, le problème de l'implantation difficile du couvert pourrait être résolu par un traitement de fusillade (herbicide qui n'élimine que les graminées) et basagran. Il serait par conséquent intéressant de continuer les recherches dans cette voie.

Les couverts de graminées semblant évoluer vers un couvert spontané à partir du 2ème cycle, il serait intéressant d'étudier un système où un **couvert spontané de graminées serait implanté** dès la plantation des vitroplants. Cet agrosystème présenterait l'avantage de faire l'économie des semences du couvert et de la main d'œuvre pour le semis du couvert. En revanche, il serait nécessaire d'étudier l'évolution des parasites, et notamment des nématodes dans ces parcelles, puisque le couvert n'étant pas contrôlé, il présente le risque de contenir des espèces de graminées hôtes de nématodes. De plus, le couvert spontané contient un grand nombre d'espèces (principalement des graminées), et par conséquent il y'a de grande chance pour qu'au moins l'une d'entre elle ait un effet allélopathique.

Un autre système de culture bananeraie enherbé intéressant à étudier serait, afin d'économiser de la main d'œuvre et des semences, **d'implanter le couvert** avant la plantation des bananiers, **pendant la jachère**. Il faudrait pour cela trouver une espèce qui réponde aux critères de plante de couverture en bananeraie et à ceux d'une plante de couverture en jachère, qui ne sont pas nécessairement compatibles.

On pourrait également réfléchir à une autre voie possible : celle **d'associer la bananeraie enherbée à de l'élevage**. Cependant, cette pratique supprimerait les restitutions des résidus de graminées, diminuant le stock d'azote biodisponible pour le bananier et la plante de couverture, et augmentant les risques de compétitions pour l'azote.

C'est typiquement pour le prototypage de ce type de systèmes de culture que l'on peut utiliser le modèle SIMBA-IC.

3. Discussion sur la gestion du couvert végétal en bananeraie

Le rythme de tonte doit être raisonné par rapport au cycle de développement du bananier et à l'itinéraire technique. D'après le fonctionnement du couvert, il apparaît qu'une coupe trop régulière (tous les mois) entraînerait :

- une concurrence trophique trop forte puisque la demande en azote est plus importante en début de phase végétative (cf courbe de dilution de l'azote)
- une sélection d'espèces de type gazon trop vigoureuse

Pour la gestion de la fertilisation et de l'entretien du couvert : en bananeraie établie, il convient de faucher environ tous les 3 mois en synchronisant la période de fauche et une période où la demande en azote du bananier n'est pas la plus élevée. En effet, il est nécessaire de désynchroniser la période où la demande en azote du bananier est la plus élevée, et la période où la demande en azote du couvert est la plus élevée (après la fauche, quand le couvert repousse : partie exponentielle et linéaire de la courbe logistique).

En outre, **le rythme de tonte doit être compatible avec les autres interventions culturales**. Tout d'abord, aucune tonte ne peut être faite entre la floraison et la récolte (durée de 3 mois) car la présence des régimes empêche un accès facilité des tracteurs. Afin de pouvoir ensuite circuler facilement dans la bananeraie au moment de la récolte, il semble nécessaire d'effectuer une coupe à la floraison. La tonte suivante se ferait après la récolte. La première tonte aurait donc lieu trois mois avant la floraison, en milieu de phase végétative.

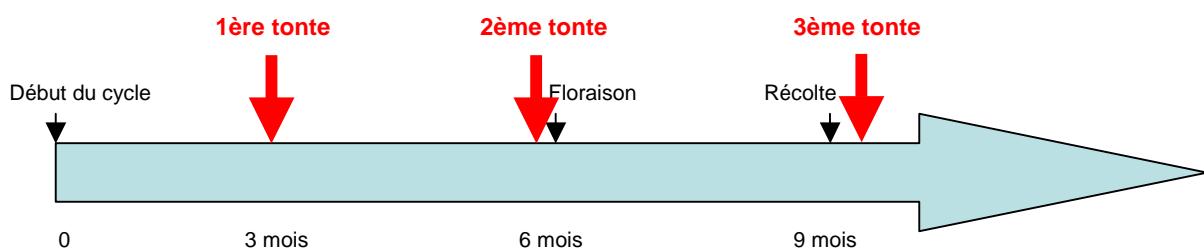


Figure 47 Suggestion du rythme de tonte en bananeraie enherbée à partir du 2ème cycle

B. Limite de la méthodologie et des résultats obtenus

En bananeraie établie :

En bananeraie établie, on n'observe pas de différence de température entre les parcelles sur sol nu et les parcelles enherbées. Cependant, la température mesurée est celle de l'air à 10 cm. Le méristème du bananier est à 10 cm du sol, mais on ne sait pas s'il prend la température du sol ou celle de l'air à 10 cm, ou une température intermédiaire. Or la température du sol est probablement plus basse en bananeraie enherbée, du fait de l'ombrage de la plante de couverture. Il faudrait mettre en place un dispositif de mesure de la température dans le bananier, au niveau du méristème.

L'effet de la concurrence de la plante de couverture a été observé sur la production de biomasse, mais pas sur les rendements, puisque nous n'avons pu suivre les bananeraies que jusqu'à la floraison. Or c'est une des composantes économiques intéressantes pour l'agriculteur.

En bananeraie en phase d'installation:

En phase d'installation, un certain nombre de vitroplants ont été attaqués par des escarbots (s'attaquent aux racines et détruisent les plants). Il y'a eu une perte non négligeable (au moins 50 vitroplants) qui a influé sur le nombre de bananiers observables. Nous avons cependant pu remplacer les plants détruits en faisant un recoufrage.

Nous avons également dû faire face à l'envahissement de certaines parcelles par du Sorghum. Pour mener à bien nos essais, nous avons dû faire appel à de la main d'œuvre pour désherber manuellement.

Lors des mesures de biomasse de la plante de couverture, nous avons uniquement pris en compte la biomasse aérienne. Or la biomasse **racinaire** peut représenter une part importante de la biomasse produite et ainsi contribuer à la concurrence vis-à-vis du bananier. Ceci pourra expliquer pourquoi Paspalum notatum, qui ne produit que peu de biomasse aérienne concurrence autant la croissance du bananier.

Modélisation :

Il aurait fallut effectuer des tests de sensibilité sur tous les paramètres du modèle afin de déterminer lesquels doivent être connus avec le plus de précision.

C. Les freins majeurs aux changements des pratiques culturales

D'après les résultats obtenus, en adoptant une gestion du couvert et de la fertilisation adéquate, l'enherbement des bananeraies semble être un futur envisageable d'un point de vue purement agronomique. Cependant, l'adoption de nouveaux systèmes de culture ne doit pas se faire sans une concertation préalable avec les planteurs, afin de discuter de l'acceptabilité et de la faisabilité de telles pratiques agricoles. Il y aura probablement un surcoût lié à l'enherbement des bananeraies :

- Fertilisation supplémentaire en début de 1er cycle pour compenser la concurrence en phase d'installation (surcoût d'autant plus important que les prix des engrais azotés augmentent)
- Désherbage manuel au pied du bananier et dans le petit rang pendant le premier cycle
- Semis du couvert végétal (semences et main d'œuvre)
- Fauche et entretien du couvert végétal

Etant donné l'intérêt environnemental de telles pratiques culturales, il serait intéressant de pouvoir compenser l'éventuel surcoût qu'elles engendrent par **l'élaboration de MAE**, comme c'est déjà le cas pour la mise en place de jachères et l'utilisation de vitro plants.

Néanmoins, le prix des pesticides augmentent, et s'ajoutant à cela les autorisations de plus en plus restrictives sur l'utilisation d'herbicides (tant sur le plan quantité d'herbicide autorisé : 2 kg/ha/an de glyphosate, que sur le plan quantité de molécules autorisées : interdictions de l'union européenne de 50 molécules, grenelle de l'environnement), les systèmes bananeraies enherbées pourraient s'avérer, dans les années à venir, plus économiques que les systèmes classiques.

D. Perspectives de travail

1. Aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée :

Il est nécessaire d'affiner la partie fonctionnement azoté du sol avec notamment :

- mesure de la minéralisation de la matière organique in situ (meilleure estimation que en pot) qui semble être un paramètre très sensible du modèle et pour l'instant mal évalué.
- mesure de la variation du compartiment biomasse microbienne, et en particulier au moment de l'apport d'engrais minéral (quelle est la part organisée ?).

2. Affiner le choix de la plante de couverture

Il est nécessaire d'aller plus loin dans l'étude des espèces implantables en bananeraie. Il faut pour cela prendre en compte tous les critères décrits dans le Tableau 1: résistance à l'ombrage, production de biomasse (aérienne et racinaire), coût, disponibilité, effet allélopathique...

3. Aller plus loin dans la calibration et la validation du modèle

Certains paramètres n'ont pas pu être mesurés ni trouvés dans la bibliographie mais sont nécessaires au fonctionnement du modèle SIMBA-IC :

- le coefficient de diffusion des fertilisants de la zone fertilisée vers la zone de transition
- acc_{biom} ; bcc_{biom} : les coefficients de la parabole reliant le rayonnement intercepté et la biomasse formée par la plante de couverture. Nous n'avons fait que quelques points qui nous ont permis de déterminer la biomasse maximale, mais nous n'avons pu en tirer les coefficients acc_{biom} ; bcc_{biom} . Il faudra par la suite, soit les mesurer en faisant plus d'observation de biomasse, soit les « fitter », si tous les autres paramètres sont bien connus.

Afin de valider le modèle, il faudra comparer les données de sorties du modèle (biomasse, teneur en azote du sol) aux données mesurées au champ. Pour cela, le critère de variabilité généralement utilisé est la somme des carrés des écarts à la moyenne, le root mean square error : RMSE.

4. Evaluation des nouveaux systèmes de culture prototypés par modélisation:

Ces nouveaux systèmes de cultures prototypés sont ensuite destinés à être mis en place chez des planteurs. Il faut avant cela évaluer leur durabilité aussi bien économique qu'environnementale et sociale. Quels critères et indicateurs faut-il prendre en compte pour évaluer la durabilité des nouveaux systèmes de cultures proposés ?

Enjeux du développement durable	Acteurs directement concernés	Critères	Indicateurs
Economique	Agriculteur	Production au champ	Rendement par hectare
	Filière	Revenu Productivité du travail Qualité	Marge brute Marge nette/jour Durée de vie verte, qualités organoleptiques, taille
Environnemental	Agriculteur	Fertilité chimique Fertilité biologique	Bilan en P et K
	Etat	Pollution de l'air Pollution de l'eau	Bilan matière organique, biodiversité Nombre traitements phytosanitaires Bilan N et résidus phytosanitaires
Social	Agriculteur	Charge de travail Technicité Risques économiques	Temps de travail Travail aux périodes de pointe Nombre d'opérations culturales Coût des intrants Coût de la main d'œuvre

Tableau 15 Evaluation économique, environnementale et sociale des systèmes de culture innovants

Ebauche d'évaluation économique des systèmes proposés :

L'évaluation économique des systèmes de cultures bananeraie enherbée proposés pourra être faite à l'aide du logiciel Banamarge®.

Les dépenses économisées :

- Désherbant
- Main d'œuvre pour l'épandage de désherbant

Les coûts supplémentaires :

- Fertilisation supplémentaire en début de 1er cycle pour compenser la concurrence en phase d'installation
- Semis du couvert végétal (semences et main d'œuvre)
- Fauche et entretien du couvert végétal

Pour finir, il sera nécessaire de faire des essais à grande échelle chez des planteurs.

5. Autres critères à prendre en compte pour la compréhension et la gestion du système de culture bananeraie enherbée :

Le fonctionnement azoté n'est pas le seul aspect de la bananeraie modifié par l'introduction d'une plante de couverture. Le fonctionnement hydrique, la dynamique des bioagresseurs sont également des aspects à prendre en compte pour mieux comprendre et gérer les systèmes de cultures bananeraie enherbée.

Conclusion

Nous avons essayé de caractériser le fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée avec pour objectif la construction d'un modèle SIMBA-IC utilisable pour le prototypage de systèmes innovants.

Les nombreux contacts établis entre le CIRAD et les planteurs de bananes permettent d'espérer qu'une application concrète de ce travail verra le jour dans les prochaines années. La généralisation de ce système de culture permettrait à la Martinique de réduire considérablement ses besoins en pesticides. En outre, si l'enherbement constitue une alternative à l'usage de pesticides, il présente également l'intérêt de limiter les phénomènes érosifs à l'échelle parcellaire. Rappelons que la Martinique est une île au relief extrêmement marqué et les bananeraies présentent souvent de très fortes pentes, sujettes à des pertes de terre importantes par érosion hydrique. Ce phénomène érosif est d'ailleurs un vecteur de la chlordécone, pesticide rémanently utilisé dans les bananeraies jusqu'en 1993 : les résidus de ce pesticide, entraînés par l'érosion, contaminent peu à peu les eaux douces et marines. Limiter les transferts de chlordécone vers les zones écologiquement fragiles ou les points de captage en eau potable constitue l'un des axes majeurs de recherche en Martinique aujourd'hui.

L'enherbement des bananeraies semble être un bon moyen de limiter l'utilisation de pesticides dans un milieu écologiquement fragilisé par des cultures intensives.

Bibliographie

Chabrier et al. (2005) Banane antillaise, les systèmes de culture évoluent : en Martinique, méthodes alternatives pour réduire l'utilisation des nématicides et insecticides en bananeraies 2005 . - p. 12-16 ,Français In : Phytoma - La défense des végétaux = ISSN 1164-6993. - (2005)n°584

Godefroy (1990) Etude de l'échantillonnage du sol en bananeraie de Martinique, 1990, Fruits

Achard, R. et Dorel, M. (2006) Chlorophyll Meter reference curve for Nitrogen Fertilizer Management during vegetative banana growth in French West Indies.

Battany M C and Grismer M E (2000) Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards : effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological processes*: 14, 1289-1304.

Brisson, N., Mary, B., Riponche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonielli, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., et Delécolle, R., (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18, 311- 346.

N. BRISSONa*, F. BUSSIÈREb, H. Ozier-LAFONTAINEb, R. TOURNEBIZEb, H. SINOQUETc. (2004) Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation

Bonzi, M., (2002) Evaluation et déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso: Etude par traçage isotopique ^{15}N au cours d'essais en station et en milieu paysan. Doctorat Sciences Agronomiques INLP. ENSAIA, Nancy, 136 pp.

Carof, (2006) Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum L.*) à différentes plantes de couverture en climat tempéré.

Cattan, P., Bussière, F., Nouvellon, A., in press. 2007 Evidence of large rainfall partitioning patterns by banana and impact on surface runoff generation. *Hydrol. Process.*

Celette, F. (2007). Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté d'une vigne enherbée – Application à un vignoble méditerranéen

Damas O., Le Bellec F., Solvar F., Tournebize R., Ozier Lafontaine H.. (2007) La production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. Intégration de la biodiversité dans les systèmes de culture : résumés des interventions, Vieux-Habitants, 08 novembre 2007. Montpellier : CIRAD, Journée sur la Production Fruitière Intégrée en Guadeloupe, 2007-11-08, Vieux-Habitants, Guadeloupe

DIREN (2006). La qualité des cours d'eau en Martinique

Doré et al., (2006) L'agronomie aujourd'hui, Analyse et modélisation du peuplement végétal cultivé

Dorel M., Achard R., Tixier P, (2008) SIMBA-N : modeling Nitrogen dynamics in Banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean.

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

Howard S B, Ong C K, Rao M R, Mathuva M and Black C (1995) The partitioning of light and water in Leucaena-maize agroforestry systems. In Ecophysiology of tropical intercropping, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 123-136. INRA, Paris.

Jeuffroy et Recous, (1999) Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization, European Journal of Agronomy 10 (1999) 129–144

Lassoudière A., (2007) Le bananier et sa culture ; Editions Quae.

Lemaire G, Gastal F and Plenet D (1997) Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modelling. In *Diagnostic procedures for crop N management*, Poitiers, Eds G Lemaire and I G Burns. pp 15-29. INRA Ed., Paris - France.

Marshall B and Willey R W (1983) Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field crops research*: 7, 141-160.

Machet J, Dubrulle P, et Louis P. (1990) AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. Congress of the European Society of Agronomy: 21-22

Roberge G. et Toutain B. Cultures fourragères tropicales ; Editions Cirad.

Santos Silva, L.M.; Ozier-Lafontaine, H.; Tournebize. R (2006) As potencialidades da associação da banana (*Musa acuminata* cultivar cavendish 'Grande naine') com o feijão-de-porco (*canavalia ensiformis* (L.) D.C.): a formalização de agroecossistemas mais sustentáveis. I Congresso Brasileiro de Agroecologia, Porto Alegre (BRA), 2003. Revista Brasileiro de Agroecologia (BRA), 1, (1), p. 49-52.

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, Volume 256, Number 2, October 2003 , pp. 333-345(13)

Stür., W.W Screening Forage Species for Shade Tolerance — A Preliminary Report

Thieuleux, (2006) Biodisponibilité de l'azote en cultures bananières sur nitisol : application à la gestion de la fertilisation azotée. Docotoral Thesis Antilles-Guyane University, Pointe à Pitre, France, 105 pp.

Tixier, (2006) Conception assistée par modèle de systèmes de culture durable : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe.

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

Vale, (2006) Quantification et prédition de la minéralisation nette de l'azote du sol *in situ*, sous divers pédo climats et systèmes de culture français.

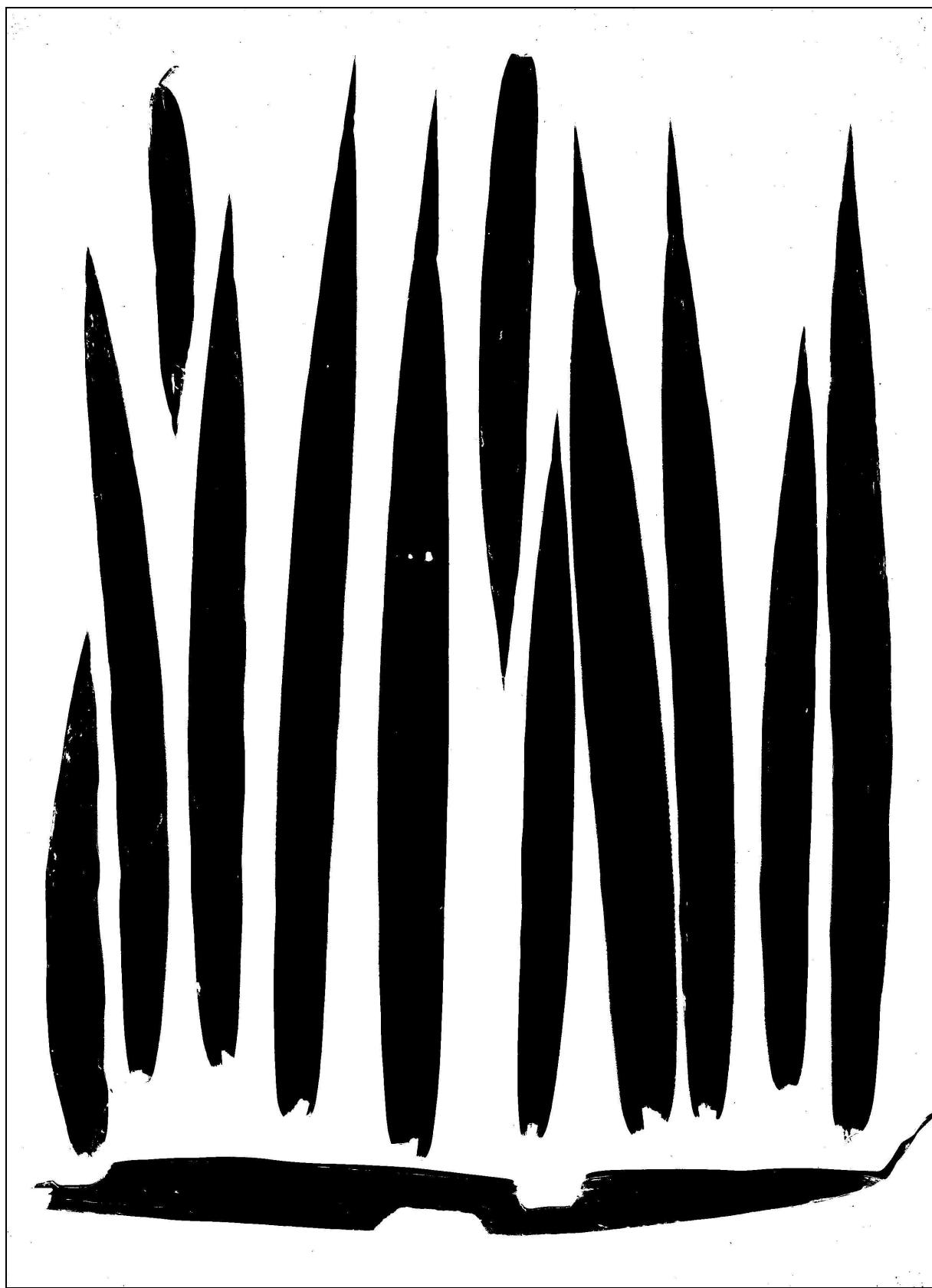
Annexe 1 : Itinéraire technique de la parcelle en expérimentation bananeraie établie (Ponterre haut)

date	feuilles émises	Intervention	Semaine	Engrais	Dose en g/bananier	QtéN en g/bananier
		Cycle 4				
28/01/2008	3	Observation	103			
28/01/2008		Prélèvement sol	103			
08/02/2008		Fertilisation	104	urée	50	23
06/03/2008		Prélèvement sol	108			
12/03/2008	4	Observation	109			
25/03/2008		Prélèvement feuille	111			
07/04/2008		Prélèvement sol	113			
09/04/2008		Fertilisation	113	urée	50	23
14/04/2008	7	Observation	114			
22/04/2008		Prélèvement sol	115			
30/04/2008		Tonte plante de couverture	116			
13/05/2008		Prélèvement sol	118			
20/05/2008	11	Observation	119			
10/06/2008		Prélèvement sol	122			
24/06/2008	15	Observation	124			
24/06/2008		Prélèvement feuille	124			
17/07/2008		Fertilisation	127	urée	60	28

Annexe 2 : Itinéraire technique de la parcelle en expérimentation bananeraie en phase d'installation (Ponterre bas)

date	feuilles émises	Intervention	Semaine	Engrais	Dose en g/ban	QtéN en g/bananier	QtéP2O5 en g/ban	Qté K2O en g/ban
16/04/2008		Plantation	1					
17/04/2008		Prélèvement sol	1					
		Fertilisation	1	DAP	30	5,4	13,8	0
29/04/2008		Observation	3					
30/04/2008		Fertilisation	3	complet 14.4.28	65	9,1	2,6	18,2
14/05/2008		Prélèvement sol	5					
29/05/2008	6	Observation	7					
05/06/2008		Prélèvement sol	8					
06/06/2008		Fertilisation	8	complet 14.4.28	65	9,1	2,6	18,2
17/06/2008		Prélèvement sol	10					
07/07/2008	12	Observation	13					
18/07/2008		Fertilisation	14	urée	60	28,1	0	0

**Annexe 3: exemple de feuilles de Brachiaria decumbens
scannées**



Annexe 4: Analyses de sol à la plantation du nouvel essai sur
Ponterre bas le 15 avril 2008

N°CIRAD PERSYT	S/08/430	S/08/431	S/08/432	S/08/433
<i>Echantillon</i>	BL1	BL2	BL3	BL4
	0-30	0-30	0-30	0-30
Acidité pH eau	5,76	6,05	6,26	5,91
Capacité d'éch. cmol eq kg-1	21,16	19,64	20,48	17,45
Sommes des B.E. cmol eq kg-1	11,79	11,34	12,77	11,65
Coefficient de Saturation	55,72	57,75	62,36	66,75
 <u>Extraction des B.E.</u>	 Acétate	 Acétate	 Acétate	 Acétate
Potassium éch. cmol eq kg-1	2,70	2,58	3,16	2,86
Calcium éch. cmol eq kg-1	6,25	6,03	6,71	5,93
Magnésium éch. cmol eq kg-1	2,84	2,73	2,90	2,86
 K/Mg	 0,95	 0,95	 1,09	 1,00
K/S %	22,90	22,77	24,76	24,54
Ca/S %	53,05	53,17	52,57	50,91
Mg/S %	24,05	24,06	22,67	24,55
 Phosphore . mg/kg	 37,31	 38,59	 36,25	 37,37
 Méthode TRUOG				
 Matière organique	 2,65	 3,09	 2,81	 2,53
Carbone g % g	1,54	1,79	1,63	1,47
Azote total g % g	0,14	0,16	0,15	0,14
C/N	11,41	11,19	10,79	10,34
 Humidité % de 70°C à 105°C	 14,26	 10,08	 13,76	 12,00
 N.B.: Résultats exprimés pour 100g de sol séché à 70°C				
 N.B.:cmol eq kg-1 = mEq / 100 g				
 Azote - NH4+ mg/kg de sol frais	 3,92	 3,40	 4,78	 4,71
Azote - NO3- mg/kg de sol frais	0,04	1,46	0,69	0,00
 Humidité % à 105°C	 33,06	 29,82	 38,93	 30,27

Annexe 5: Description du modèle SIMBA-IC

Avec :

t : le pas de temps du modèle en semaine

i : le cycle de culture de bananier

j : compartiment de spatialisation horizontale (sous la bananier, petit-rang, zone de transition, grand-rang)

Module de développement du bananier

Variables

T(t) : température cumulée hebdomadaire au pas de temps t

SUMT(i,t) : somme de température accumulée par le cycle i au pas de temps t

FLO(i) : état fleuri du bananier du cycle i

REC(i) : état récolté du bananier du cycle i

SUC(i) : état d'émission du rejet du bananier du cycle i

Paramètres

T(t) : température cumulée hebdomadaire au pas de temps t

BT : base de température (zéro physiologique)

SUMTflo : somme de température entre la plantation/apparition du rejet du cycle n-1 et la floraison

SUMTrec : somme de température entre la plantation/apparition du rejet du cycle n-1 et la récolte

SUMTsuc : somme de température entre la plantation/apparition du rejet du cycle n-1 et la l'apparition du rejet du cycle n

Equations

$$\text{SUMT}(i,t) = \text{SUMT}(i,t-1) + T(t)$$

$$\begin{cases} - \text{ si } (\text{SUMT}(i,t) \geq \text{SUMTflo}) \\ - \text{ alors } \text{FLO}(i) = 1 \\ - \text{ sinon } \text{FLO}(i) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} - \text{ si } (\text{SUMT}(i,t) \geq \text{SUMTrec}) \\ - \text{ alors } \text{REC}(i) = 1 \\ - \text{ sinon } \text{REC}(i) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} - \text{ si } (\text{SUMT}(i,t) \geq \text{SUMTsuc}) \\ - \text{ alors } \text{SUC}(i) = 1 \\ - \text{ sinon } \text{SUC}(i) = 0 \end{cases}$$

Module de croissance bananier

Variables

LAI(i,t) : indice de surface foliaire d'un bananiers du cycle i au pas de temps t ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

LAI(t) : indice de surface foliaire de la population de bananier au pas de temps t ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

BIOM(t) : biomasse d'un bananier du cycle i au pas de temps t (kg)

deltaBIOM(i,t) : formation de biomasse d'un bananiers du cycle i au pas de temps t (kg)

deltaLAI(i,t) : variation d'indice de surface foliaire d'un bananiers du cycle i au pas de temps t ($m^2.m^{-2}$)

Rg(t) : rayonnement global ($MJ.m^{-2}$)

PAR(i,t) : rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par un bananier du cycle i ay pas de temps t ($MJ.m^{-2}$)

Stress(t) : Coefficient de stress azoté de croissance en biomasse du bananier

NC(t) : concentration d'azote dans la biomasse de bananier (courbe de dilution)

Paramètres

K_{intercept} : coefficient d'interception du rayonnement par le bananier

a_{biom} ; b_{biom} : coefficients de la parabole reliant le rayonnement intercepté et la biomasse formée

su : Surface unitaire bananier (m^2)

SLA : surface massique des feuilles de bananiers ($m^2.kg^{-1}$)

pr : pourcentage alloué au rejet

ILAI : coefficient d'inhibition du LAI par le pied mère (0=inhibition totale ; 1=pas d'inhibition)

Equations

$$PAR(i,t) = (0.95*0.48).Rg(t).(1-EXP^{(-K_{intercept}*LAI(i,t))})$$

$$\text{deltaBIOM}(i,t) = (a_{biom}.PAR(i,t)^2+b_{biom}.PAR(i,t)).\text{Stress}(t).(1-\text{REC}(i))$$

$$\text{deltaLAI}(i,t) = (((\text{deltaBIOM}(i,t)-\text{reallocrejet}(i,t)).SLA)/su).(1-\text{FLO}(i)).(1-\text{FLO}(i,1,t)).ILAI)$$

$$AR(i,t) = \text{deltaBIOM}(i,t).pr.\text{SUC}(i,t)$$

$$BIOM(t) = ((BIOM(t-1)+(\text{deltaBIOM}(i,t))+AR(i-1,t)-AR(i+1,t)).(1-\text{FL}(i)))$$

$$BIOMR(t) = ((BIOM(t-1)+(\text{deltaBIOM}(i,t))+AR(i-1,t)-AR(i+1,t)).(\text{FL}(i)))$$

$$LAI(i,t) = \sum_{i=1}^t LAI(i,t)$$

$$LAI(t) = \sum_{i=n}^t \sum_{j=1}^n N_{prelevreel}(j,t)$$

$$Stress(t) = \frac{\sum_{j=1}^4 N_{demande}(j,t)}{\sum_{i=1}^t BIOM(i,t)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{- si : } \sum_{i=1}^t BIOM(i,t) < 2000 \\ \text{- alors : } NC(t) = 0.04 \\ \text{- sinon : } NC(t) = (5.7 / ((\sum_{i=1}^t BIOM(i,t) / 1000)^2)) / 100 \end{array} \right.$$

Module de croissance plante de couverture

Variables

LAicc(j,t) : indice de surface foliaire de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($m^2.m^{-2}$)

BIOMcc(j,t) : biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t (kg)

deltaBIOMcc(j,t) : formation de biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t (kg)

deltaLAIcc(j,t) : variation d'indice de surface foliaire de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($m^2.m^{-2}$)

$\text{PARcc}(j,t)$: rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

$\text{Stresscc}(j,t)$: Coefficient de stress azoté de croissance en biomasse de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{PLAI}(j,t)$: pourcentage de LAI bananier dans le compartiment j au pas de temps t (%)

$\text{KI}(j,t)$: coefficient d'interception du rayonnement par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{RGcc}(j,t)$: rayonnement disponible pour la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

$\text{Ncc}(j,t)$: prélèvement en azote de la plante de couverture dans le compartiment j au pas de temps t

Paramètres

Klaiban : coefficient de la droite d'interception du rayonnement par le LAI bananier (0.23)

$\text{Kcc}_{\text{intercept}}$: coefficient d'interception du rayonnement par la plante de couverture

acc_{biom} ; bcc_{biom} : coefficients de la parabole reliant le rayonnement intercepté et la biomasse formée par la plante de couverture

SLAcc : surface massique des feuilles de plante de couverture ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)

NCcc : concentration d'azote dans la biomasse de plante de couverture

Equations

$\text{PLAI}(j,t) = \text{PER}(j,t)$

$\text{KI}(j,t) = \text{Klaiban} \cdot \text{LAI}(i,t) \cdot \text{PLAI}(j,t)$

$\text{RGcc}(j,t) = \text{Rg}(t) * (1 - \text{KI}(j,t))$

$\text{PARcc}(j,t) = (0.95 * 0.48) \cdot \text{RGcc}(t) \cdot (1 - \text{EXP}^{(-\text{Kcc}_{\text{intercept}} * \text{LAIcc}(j,t))})$

$\text{deltaBIOMcc}(j,t) = (\text{acc}_{\text{biom}} \cdot \text{PARcc}(j,t)^2 + \text{bcc}_{\text{biom}} \cdot \text{PARcc}(j,t)) \cdot \text{Stresscc}(t)$

$\text{deltaLAIcc}(j,t) = \text{deltaBIOMcc}(j,t) \cdot \text{SLAcc}$

$\text{BIOM}(j,t) = \text{BIOM}(t-1) + \text{deltaBIOM}(j,t)$

$\text{LAIcc}(j,t) = \text{LAIcc}(j,t-1) + \text{deltaLAI}(j,t)$

$\text{Ncc}(j,t) = \text{deltaBIOMcc}(j,t) \cdot \text{CNcc}$

$\text{Stresscc}(j,t) = \text{N}(j,t) / \text{Ncc}(j,t)$

Module spatialisation du bilan azoté

Variables

$\text{PER}(j,t)$: pourcentage d'exploration racinaire du bananier dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{N}(j,t)$: stock d'azote dans le sol du compartiment j au pas de temps t (Kg)

$\text{PPMN}(j,t)$: concentration en azote dans le sol du compartiment j au pas de temps t

$\text{Npot}(j,t)$: Azote potentiellement utilisable par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{Npottot}(t)$: Azote total potentiellement utilisable par le bananier au pas de temps t

$\text{NP}(j,t)$: azote prélevé par le bananier dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{Ndemandej}(j,t)$: demande en azote du bananier dans le compartiment j au pas de temps t

$\text{Ndemande}(t)$: demande en azote du bananier au pas de temps t

$\text{PCV}(i,t)$: azote remobilisé de la souche du cycle $i-1$ au pas de temps t

Paramètres

$p(j)$: pourcentage de surface du compartiment j (%)

ds : densité du sol

pr : profondeur de sol (m)

Equations

$$PER(j,t) = f(L \sum_{j=1}^{j=1} N(j,t)) \rightarrow$$

$$PPMN(j,t) = \frac{ds \cdot pr \cdot R(j)}{10000 \cdot PER(j,t)}$$

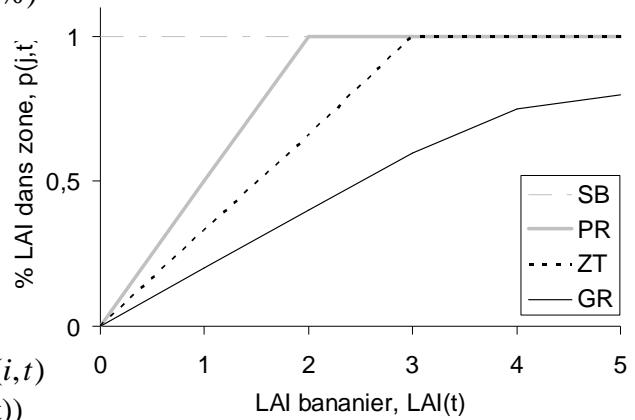
$$Npot(j,t) = PPMN(j,t) \cdot 10000 \cdot PER(j,t)$$

$$Npottot(t) = \sum Npot(j,t)$$

$$Ndemande(t) = \sum_{i=4}^4 \delta BIOM(i,t) \cdot NC(t) - PVC(i,t)$$

$$Ndemandej(j,t) = Ndemande(t) \cdot (Npot(j,t) / Ntot(t))$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{- si } Ndemandej(j,t) + Nvv(j,t) \geq N(j,t) \\ \text{- alors } Nprelevreel(j,t) = Ndemandej(j,t) \\ \text{- sinon } Nprelevreel(j,t) = N(j,t) - Ncc(j,t) \end{array} \right.$$



Annexe 6: Un stage suivi par la presse locale

Mardi 10 juin 2008

8

Chef de centre
Jean-Luc Médouze
0696 72 88 16.

EXPRESS

Les Charlies Angels de l'agronomie

FRANÇOIS. Ces trois charmantes jeunes futures ingénieries agronomes sont en stage jusqu'en septembre en Martinique. Aude Jaurence travaille sur la banane, Anne Catteau sur la chlordécone et Mayli Scali sur le bassin-versant de la Lézarde. Elles traitent visiblement de sujets qui nous tiennent à cœur. Elles ne sont donc pas des drôles de dames aussi, on ne doute pas du plaisir que vous éprouverez à les aider dans leurs recherches.
J.-C.C. ■



Résumé

Les exportations de banane dessert représentent une part importante des productions agricoles des Antilles Françaises. Ce sont encore souvent des systèmes de monocultures intensives utilisant massivement engrais et produits phytosanitaires. Cependant, face à des réglementations de plus en plus strictes concernant l'utilisation des pesticides et le respect de « bonnes pratiques agricoles », ces systèmes de cultures évoluent.

Ainsi, l'introduction d'un enherbement en bananeraie est une alternative intéressante à l'utilisation d'herbicide puisqu'il assure certaines fonctions de protection de l'agrosystème et de l'environnement en général: protection contre l'érosion, augmentation de la biodiversité du sol, amélioration du statut organique du sol...

Se pose donc la question de l'effet de l'introduction d'un enherbement en bananeraie. Nous avons concentré notre étude sur le fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée. D'après les premiers résultats obtenus au CIRAD Martinique et Guadeloupe, on peut supposer qu'en bananeraie en phase d'installation la compétition pour l'azote est forte, mais qu'en bananeraie établie et en condition de fertilisation non limitante, la concurrence est tolérable. En outre on peut penser que l'introduction d'un enherbement augmente l'hétérogénéité spatiale en bananeraie.

Afin de tester ces hypothèses, nous avons mis en place un double dispositif expérimental en considérant deux situations initiales: une bananeraie établie et une bananeraie en phase d'installation. Nous avons pu suivre la dynamique de l'azote du sol en plusieurs zones ainsi que le fonctionnement du bananier et de la plante de couverture. Les résultats obtenus nous ont permis de caractériser l'effet de l'enherbement d'une part sur la croissance des bananiers et d'autre part sur le fonctionnement azoté de la bananeraie.

Nous avons pu vérifier qu'en phase d'installation, la compétition pour l'azote était très importante. En revanche, bien que faible, il existe un retard de croissance en bananeraie établie. Cependant, une fertilisation légèrement supérieure suffirait probablement à compenser ces effets.

Nous avons également montré que l'hétérogénéité spatiale en bananeraie était renforcée par l'introduction d'une plante de couverture puisque d'une part la dynamique d'azote dans le sol n'est pas la même selon les zones considérées et d'autre part la biomasse produite par la plante de couverture ainsi que sa teneur en azote est différente selon la zone observée.

En parallèle, nous avons essayé de modéliser le fonctionnement azoté d'une bananeraie enherbée en adaptant le modèle pré-existant SIMBA-N. Pour cela, nous avons d'une part spatialisé le fonctionnement azoté du sol et de la bananeraie et d'autre part ajouté un module de croissance de la plante de couverture. Ensuite, grâce aux données obtenues lors de la phase d'expérimentation, nous avons pu paramétrier ce modèle. Cependant, le modèle n'a pu être validé et doit donc être re-travaillé afin d'être utilisable pour le prototypage de systèmes de culture bananeraie enherbée.

Mots clés: système de culture bananier, azote, cultures associées, modélisation, spatialisation

Abstract

Banana farming is an important part of the French West Indies agricultural production. Yet, these cropping system are still dependant on massive use of fertilizers and pesticides. However, with legislation becoming stricter, those cropping systems are changing.

Therefore, using a cover crop in banana plantation is an interesting alternative to the use of herbicides as it also helps protecting agronomical and environmental components of the system: protection against soil erosion, increasing biodiversity...

We studied the impact of implanting a cover crop in banana fields. We focused our work on the nitrogen functioning of a grassed banana plantation. According to the first results obtained by the CIRAD in Martinique and Guadeloupe the last few years, we can asset that in young banana plantation, competition for nitrogen is high, whereas in established Banana plantation with non limiting fertilization, the competition becomes tolerable. Furthermore, we can asset that implanting a cover crop will increase the spatial heterogeneity in banana plantation.

In order to test these hypotheses, two experiments were carried out with two different initial situations: a young banana plantation and an established banana plantation. We followed the dynamics of soil nitrogen in several zones as well as the functioning of the banana tree and of the cover crop. The results we got allowed us to characterize on one hand the growth of banana trees and on the other hand the soil nitrogen functioning.

We were able to check that during the installation phase, competition for nitrogen was very high. On the contrary, although weak, a growth lateness was observed in established banana plantation. However, a slightly increase in the fertilization dose would probably be enough to compensate those effects.

We also showed that spatial heterogeneity in banana plantation was increased by the introduction of a cover crop as the dynamics of soil nitrogen and biomass production and nitrogen content of the cover crop is not the same depending on the zone you consider.

At the same time, we tried to model the nitrogen functioning of a grassed banana plantation by adapting the existing model: SIMBA-N. In order to do that we spatialized the soil nitrogen functioning and we added a module of the growth of the cover crop. Then, thanks to the data we got from the experimentations, we were able to set the parameters of the model. However, the model was not validated and has to be worked on again in order to be used to prototype new cropping systems.

Key words : banana cropping system, nitrogen, intercropping, , crop model, spatialization