Alternatives agro-écologiques à l'usage des intrants chimiques dans les bananeraies plantains - Le cas de deux régions de la Caraïbe : Guadeloupe et Haïti

Brunise Deloné

▶ **To cite this version:**

Brunise Deloné. Alternatives agro-écologiques à l'usage des intrants chimiques dans les bananeraies plantains - Le cas de deux régions de la Caraïbe : Guadeloupe et Haïti. Sciences agricoles. Université des Antilles et de la Guyane, 2014. Français. NNT : . tel-02801753

HAL Id: tel-02801753
https://hal.inrae.fr/tel-02801753

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale pluridisciplinaire de l'Université des Antilles et de la Guyane

UR1321, ASTRO AgroSystèmes TROpicaux

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université des Antilles et de la Guyane

Spécialité : Physiologie et Biologie des organismes –populations-interactions

Alternatives agro-écologiques à l'usage des intrants chimiques dans les bananeraies plantains

Le cas de deux régions de la Caraïbe : Guadeloupe et Haïti

Présentée et Soutenue publiquement le 01 octobre 2014 à L'INRA Antilles-Guyane

Par Brunise DELONÉ

Devant le **JURY** composé de :

Patrick LAVELLE	Professeur émérite, UPMC-Paris VI	Rapporteur/Président Jury
Patrick QUÉNÉHERVÉ	Directeur de Recherches, IRD Martinique	Rapporteur
Gladys LORANGER-MERCIRIS	Maître de Conférence/HDR, UAG	Directrice de thèse
Harry OZIER LAFONTAINE	Directeur de recherches, UR1321 ASTRO INRA	Co-Directeur de thèse

Ce travail de thèse est dédié à ma chère et tendre fille Emmanuella et à mon époux pour son soutien et sa compréhension.

REMERCIEMENTS

Sans l'aide de nombreuses personnes, que ce soit à travers un appui scientifique ou un soutien moral, cette thèse n'aurait jamais abouti. Je tiens à leur témoigner très sincèrement ma considération. Si j'ai oublié de citer certaines personnes de cette liste non exhaustive, qu'elles veuillent bien m'en excuser, ma profonde gratitude leur est acquise.

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Gladys Loranger-Merciris et Harry Ozier Lafontaine, qui m'ont encadré pendant ce long parcours de doctorante. Je retiendrai leur grand intérêt pour mon travail de recherche, leur écoute, leur disponibilité sans faille et leur rigueur scientifique qui m'ont beaucoup apporté sur le plan professionnel. Ils ont toujours eu les mots qu'il fallait pour me booster dans les moments difficiles. Leurs critiques et conseils avisés m'ont beaucoup aidé à finaliser la rédaction de ce manuscrit. Je leur dis très sincèrement MERCI !

Je dois remercier l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. Un très grand merci à Patrick Lavelle et Patrick Quénéhervé d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, malgré leur emploi du temps très chargé.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Cathy Clermont-Dauphin, Jorge Sierra et Carine L. Collin, d'avoir accepté de lire ce manuscrit. Vos suggestions et commentaires sur ce travail m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie également Nicolas Ophny Carvil qui m'a supporté et aidé durant la réalisation de l'enquête et le diagnostic agro-écologique en Haïti. Que Patrice Charles soit remercié pour avoir été toujours à l'écoute et répondu à mes interrogations.

Ma reconnaissance va aussi aux stagiaires qui ont participé largement aux enquêtes ou au diagnostic agro-écologique : Claire Forite, Ogisma Alexandre, Danielle Ramaël.

Mes remerciements s'adressent à Marc Dorel, Kodjo Tomékpe d'avoir toujours été à l'écoute et répondu à mes requêtes. Que Jean Louis Diman soit remercié pour son aide dans l'élaboration du questionnaire d'enquête, des traitements statistiques des données et dans la relecture de cette thèse. Toute ma gratitude va à Jean Luc Gourdine et Denis Cornet pour leur appui dans les dernières analyses de données.
Je ne saurais oublier la collaboration de toute une équipe qui m'a supporté et aidé durant ce travail de recherche. Leur participation et leur disponibilité m'ont été précieuses. Je tiens tout particulièrement à remercier Frédérique Razan qui a toujours été à mes côtés et qui fut pour moi une excellente collègue de travail. Elle a beaucoup contribué aux volets multiplication des PIFs « Plants Issus de Fragments de tiges », mycorhizes et toute l'organisation des sorties de terrain. J'ai une pensée toute particulière pour Fred Burner, responsable de la parcelle expérimentale de ce travail, pour sa volonté, son courage et son dévouement. Sans lui l'expérimentation au champ n'aurait pas été menée à terme. Je remercie sincèrement Lucienne Desfontaines, Jocelyne Leinster, Béatrice Félix, Marie Carmel Alcindor, qui ont joué un rôle majeur dans la caractérisation des éléments chimiques des sols. Merci également à l'ensemble de l'équipe technique qui m'a beaucoup aidé pour la mise en place de mon dispositif expérimental et/ou le diagnostic agro-écologique. Que Chantal Fléreau, Sylvestre Jacoby-Koaly,

Dominique Denon, Guy Gougougnan, Jean-Pierre Cinna, Thierry Bajazet, Jean-Baptiste Nanette, Andève Mulciba, Nazaire Robin, Alfred Venthou-Dumaine, Frantz Germain, Solange Pallud, Michèle Salles, Sophie Briand, Pascale Bade, Franck Solvar, Pierre Marival, Nicole Edinval, Véronique Bapaume, Pierre Virapin, Frédéric Pommier, Beauchamps Ilertant, Jeff Ismaël, Kesnel Louis Jeune, Molière Louis Jeune, Alix Guillaume, Anglade Féquière, Renette Deloné trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Que les chercheurs et thésards qui m'ont soutenu et aidé durant cette thèse trouvent ici l'expression de toute ma gratitude : François Bussière, Harry Archimède, Jean-Marc Blazy, Laurent Penet, Carla Barlagne, Murielle Mantran, Isabelle Boulogne, Mylène L'Etang, Pierre Chopin, Julie Faverial, Nizar Salah.
Que les personnels administratifs en Guadeloupe : Patrick Labbé, Maryse Cyrille, Patricia Traffond, Nadine Jovial, Monique Degnace, Marie-Chantal Ferdinand comme en Haïti : Bérard Cénatus, Fritz Désormes, Jacky Lumarque, Evens Emmanuel, Evenson Calixte, Marie Giselle P.A. Pierre, Evelyne Bouchereau, Katty Saint Louis, Ania Levasseur, Myriam P.O. Jean Charles, Gaël Pressoir soient remerciés pour leur aide et leur soutien.

Notre travail n'aurait guère de sens si nous ne prenions en compte nos utilisateurs finaux. J'ai eu la chance de rencontrer en Guadeloupe comme en Haïti de nombreux agriculteurs formidables. Je ne peux les citer tous… Néanmoins, je dois remercier spécialement Léonard Jean Marcel, Edouard Louis, Benech Jean Yves, Karl Moreau, Céramont Romelus et Décius Frantz Leroy pour leur accueil et leur aide. Leur disponibilité et leur contribution à ce travail de thèse méritent d'être soulignées. Sans eux, il n'y aurait pas eu ce travail.

Que toutes les institutions qui ont financé ce travail de thèse : AUF (Agence Universitaire de la Francophonie), INRA (Institut National de Recherches Agronomiques), UniQ (Université Quisqueya), FOKAL (Fondasyon Konesans Ak Libété/Fondation Connaissance & Liberté), FCR (Fonds de Coopération Régionale), Fondation ELLE trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Ma gratitude va à la famille JEROME D. Joseph qui m'a encouragé et soutenu durant la réalisation de cette thèse.
Je remercie mes parents ainsi que mes frères et sœurs qui ont contribué à ma réussite scolaire, sans qui ce travail n'aurait probablement pas vu le jour.

Une dernière pensée ira à ma famille : à mon époux Manès, je te suis tellement redevable qu'il me faudrait une autre thèse pour l'expliquer ! Merci pour ton soutien inconditionnel, ta franchise, ton affection et ta faculté extraordinaire de comprendre les gens et d'être à l'écoute. Merci d'avoir supporté mes doutes, mes variations d'humeurs et mes longs moments d'absence, où mes « compagnons obligés » étaient mon ordinateur et de nombreux documents éparpillés sur la table ! Une étape importante a été franchie. Cette thèse, je te la dois, tout simplement. Maintenant, c'est à ton tour de finir la tienne ; à ma tendre princesse Emmanuella, toi qui es née pendant cette thèse, tu es le plus beau cadeau qui m'est venu du ciel. Merci pour ta joie de vivre qui me rend si heureuse et me remplit d'inspiration pour avancer, malgré les moments difficiles.

Tous, je vous remercie.

RÉSUMÉ

La banane plantain (*Musa paradisiaca*) est l'aliment de base de millions de personnes dans le monde et sa culture génère des revenus permanents pour un grand nombre d'agriculteurs, dans des plantations de taille petite ou moyenne. Comme dans d'autres régions tropicales, la culture du plantain en Guadeloupe et en Haïti est soumise à de fortes contraintes parasitaires aussi bien telluriques (i.e. du sol : nématodes phytoparasites et charançon du bananier) qu'aériennes (Cercosporiose noire notamment). Les moyens de lutte conventionnels reposent sur l'usage de produits de synthèse dont les effets néfastes sur l'environnement (sols, eaux, animaux) comme sur la santé humaine ne sont plus supportables. Il est donc urgent de réfléchir à des solutions agro-écologiques permettant de rétablir les équilibres biologiques, de maintenir une bonne qualité des sols et une production optimale dans les systèmes de culture plantains.

C'est le but de ce travail de thèse qui couple la réalisation d'un diagnostic agro-écologique dans des parcelles paysannes, et le test d'alternatives agro-écologiques en milieu semi-contrôlé. Pour ce faire, une typologie des systèmes de culture plantains a été réalisée à l'issue d'une enquête agro-environnementale dans les deux zones d'étude. Elle a permis de sélectionner 23 parcelles en Guadeloupe et 12 en Haïti dans lesquelles un diagnostic agro-écologique a été conduit. Sur la base de ce diagnostic et de la recherche d'alternatives agro-écologiques à l'usage des produits chimiques, une expérimentation au champ a été mise en place en Guadeloupe en station de recherche, permettant le test de trois pratiques culturales innovantes pour le plantain (seules et combinées), à savoir : i) l'introduction d'une plante de service *Paspalum notatum* pour la gestion des adventices et la réduction de l'utilisation d'herbicides ; ii) l'apport de vermicompost pour le contrôle des nématodes phytoparasites inféodés au bananier plantain et la fertilisation de celui-ci ; iii) l'utilisation de plants sains PIF (Plants Issus de Fragments de tiges) indemnes de nématodes et de larves de charançon du bananier.

La typologie des systèmes de culture plantains révèle que : i) en Guadeloupe les précédents : jachère, ananas et banane plantain sont prédominants avec un niveau d'intensification faible (apports d'intrants chimiques faibles et peu fréquents) ou élevé (apports d'intrants chimiques élevés et plus fréquents) ; ii) en Haïti, les précédents : jachère, banane plantain et manioc prédominent avec un niveau d'intensification faible ou nul (apport d'intrants inexistant). Les résultats du diagnostic agro-écologique montrent que, i) lorsque le niveau d'intensification est faible, les bananeraies plantains pérennes et le précédent-ananas permettent de maintenir une bonne qualité du sol et une bonne régulation des parasites telluriques ; ii) lorsque le niveau d'intensification est fort, les populations d'ingénieurs du sol diminuent drastiquement, alors que le cortège parasitaire tellurique augmente sans que cela n'affecte l'obtention de bons niveaux de rendement instantannés (parcelles précédées d'ananas ou d'une jachère principalement) ; iii) en absence totale de fertilisation, il résulte une diminution de l'activité biologique du sol mais aussi du rendement du plantain, exacerbé par le choix des précédents-culturaux (manioc ou banane plantain) en lien avec les contraintes pédoclimatiques et la maladie des raies noires (Cercosporiose noire) causée par *Mycosphaerella fijiensis*, notamment au sein des parcelles Haïtiennes ; iv) la succession plantain/plantain est la plus pénalisante vis-à-vis de la culture du plantain, car quelque soit le niveau d'intensification, le rendement reste relativement faible, en lien avec une dégradation de l'état sanitaire, comparativement aux autres précédents.

La conduite d'une expérimentation en station de recherche, montre qu'à l'échelle d'une année, les trois pratiques innovantes testées permettent de maintenir une bonne qualité des sols. Les plants sains « PIF » jouissent d'un meilleur état sanitaire (absence de nématodes phytoparasites dans les racines), et permettent d'augmenter sensiblement le rendement. La plante de service *P. notatum* permet de maîtriser l'enherbement, les parasites telluriques et d'augmenter l'activité biologique des sols ainsi que le rendement du plantain. Le vermicompost contribue au maintien d'une meilleure qualité des sols tout en permettant la régulation des populations des nématodes phytoparasites des bananiers plantains. La réduction du travail du sol, l'assainissement des sols (par une jachère ou une culture d'ananas), et les pratiques culturales innovantes, représentent d'excellentes alternatives agricoles à l'usage des produits chimiques dans la lutte contre les ravageurs telluriques. La suite de ce travail consistera à évaluer les contraintes technico-économiques de mise en œuvre de ces pratiques agro-écologiques innovantes dans les exploitations agricoles, en vue d'en mesurer leur adoptabilité par les agriculteurs.

Mots clés : agrégats du sol, agroécologie, banane plantain, charançon du bananier, diagnostic, durabilité, enquête agro-environnementale, fertilisation, fertilité, mycorrhize, nématodes phytoparasites, qualité du sol, plante de service, vermicompost, rendement, santé de la plante, sol, Sigatoka, systèmes de culture.

ABSTRACT

Plantain (*Musa paradisiaca*) is the staple food of millions of people worldwide and its cropping generates ongoing revenues for many farmers who are planting small or medium size areas. As in other tropical regions, plantain cultivation in Guadeloupe and Haiti is under heavy parasitic constraints terrestrial (plant-parasitic nematodes and banana weevil) as well as aerial (black Sigatoka in particular). Conventional means of control based on the use of synthetic products which adverse effects on the environment (soil, water, animals ...) as on human health are not bearable any more. It is thus urgent to think about agroecological solutions allowing to restore the biological balances, to maintain good soil quality and optimal plantain cropping systems.

This is the ultimate goal of this thesis which couples the realization of an agroecological diagnosis in peasants' plots, and the test of agroecological alternatives in semi-controlled conditions. To do this, a typology of plantain cropping systems was carried out from an agrienvironmental survey in the two study areas. It allowed to select 23 plots in Guadeloupe and 12 in Haiti in which an agroecological diagnosis was implemented. Based on this diagnosis and the research of agroecological alternatives to the use of chemicals, a field experiment was set up in Guadeloupe, in an experimental station allowing the test of three innovative practices for plantain cultivation (alone and combined), namely : i) the introduction of a cover-crop *Paspalum notatum* for weed control while reducing the use of herbicides ; ii) the input of worms' compost to control plant-parasitic nematodes specific to plantain and to fertilize it ; iii) the use of healthy "PIF" plants (plants issued from stem fragments) free from telluric pests (nematodes and weevil's larvaes).

The typology of plantains cropping systems shows: i) in Guadeloupe the previous crops are: fallow pineapple and plantain predominate with a low level of intensification (low and infrequent chemical inputs) or high (high and frequent chemical inputs); ii) in Haiti, the previous crops are: fallow, plantain and cassava predominate with a low level or no intensification at all (no inputs). The results of the agroecological analysis show that : i) when the level of intensification is low, perennial plantain and pineapple as previous crops help maintaining a good soil quality and a good regulation of the telluric pests ; ii) when the level of intensification is strong, the soil engineers drastically reduce, while the density of telluric parasites increases without affecting good levels of instantaneous yields (plots where the previous crop is pineapple or mostly fallow) ; iii) when the fertilization is totally missing, it decreases the biological activity of the soil furthermore the plantain yields, exacerbated by the choice of the previous crop (cassava or plantain), in connection with soils and climate constraints and the black Sigatoka caused by *Mycosphaerella fijiensis*, especially in the Haitian plots ; iv) the crop succession plantain/plantain is the most critical regarding the plantain's cropping, because whatever the level of intensification, the yields remain relatively low in connection with a degradation of the health state, compared to other previous crops.

The driving of an experiment in a research station shows that on the scale of one year, the three tested innovative practices allow maintaining a good soils quality. Healthy plants "PIF" have a better health state (absence of plant parasitic nematodes in the roots) which helps a significant increase of the yields. Cover-crop *P. notatum* helps the weeds and the soil pests control and favors the improvement of soil biological activity and plantain yields. Worms' compost contributes to the maintenance of a better soils quality while allowing the regulation of the populations of plant-parasitic nematodes of the plantains. Reducing tillage, soil remediation (by fallow or pineapple cropping) and innovative farming practices are excellent agricultural alternatives to the use of chemicals in the fight against soil pests. The following of this work will consist in the evaluation of the technico-economical constraints for the implementation of these innovative agroecological practices in farms, in order to measure their adoptability by farmers.

Keywords : soils'aggregates, agroecology, plantain, banana weevil, diagnosis, sustainability, agri-environmental survey, fertilization, mycorrhiza, plant-parasitic nematodes, soil quality, cover-crop, worms' compost, yield, plant health, Sigatoka, cropping systems.

RESUMEN

El plátano (*Musa paradisiaca*) es el alimento básico de millones de personas en todo el mundo y el cultivo genera ingresos permanentes para muchos agricultores de pequeñas o medianas áreas sembradas. Como en otras regiones tropicales, el cultivo de plátano en Guadalupe y Haití se encuentra bajo limitantes parasitarias tanto terrestres (nematodos parásitos de plantas y de gorgojos) como aéreas (Sigatoka negra en particular). Los medios convencionales de lucha son basados en el uso de productos de síntesis, cuyos efectos negativos sobre el medio ambiente (suelo, agua, animales) como sobre la salud humana, ya no son soportables. Pues, es urgente reflexionar sobre soluciones agroecológicas para restaurar los equilibrios biológicos, mantener una buena calidad del suelo y a la vez, una producción óptima de los sistemas de cultivo de plátano.

Este es el propósito final de esta tesis que acopla la realización de un diagnóstico agroecológico en parcelas campesinas, y el ensayo de alternativas agroecológicas en ambiente semi controlado. Para lograrlo, se realizó una tipificación de los sistemas de cultivo de plátano a partir de una encuesta agroambiental en las dos áreas de estudio. Se utilizó para seleccionar 23 parcelas en Guadalupe y 12 en Haití en las cuales se implementó un análisis agroecológico. En base a este diagnóstico y a la investigación de alternativas agroecológicas al uso de productos químicos, una experimentación de campo fue implementada en Guadalupe en una estación de investigación, para comprobar tres prácticas agrícolas innovadoras para el plátano (solas y en combinación), a saber : i) la introducción de una planta de servicio *Paspalum notatum* para el control de malezas y la reducción del uso de herbicidas ; ii) el suministro de lombricompost para el control de nematodos fitoparásitos específicos del plátano asi como su fertilización ; iii) el uso de plantas sanas "PIF"(Plantas nacidas a partir de fragmentos de tallos) libres de nemátodos y larvas del Picudo negro del plátano.

La tipificación de los sistemas de cultivo de plátano revela que : i) en Guadalupe como cultivos precedentes : barbecho, piña y plátano son predominantes con un nivel de intensificación bajo (aportes de insumos químicos bajos y escasos) o fuerte (aportes de insumos químicos fuertes y más frecuentes) ; ii) en Haití, como cultivos precedentes : barbecho, plátano y yuca predominan con un nivel de intensificación bajo o nulo (aportes de insumos inexistentes). Los resultados del diagnóstico agroecológico muestran que : i) cuando el nivel de intensificación es bajo, el plátano perenne y la piña anterior ayudan en mantener un suelo de buena calidad y una buena regulación de los parásitos del suelo ; ii) cuando el nivel de intensificación es fuerte, los ingenieros del suelo reducen drásticamente, mientras que el conjunto parasitario telúrico aumenta sin que esto afecte la obtención de buenos niveles de rendimiento instantáneo (parcelas con un cultivo anterior que sea piña o barbecho principalmente) ; iii) la falta total de fertilización, lleva a una disminución de la actividad biológica en el suelo, asi como del rendimiento estimado de plátano, exacerbado según la elección de los cultivos precedentes (yuca o plátano), en relación con las limitaciones pedoclimáticas y la Sigatoka negra causada por *Mycosphaerella fijiensis*, especialmente en las parcelas de Haití ; iv) la sucesión de cultivo plátano/plátano es lo más crítico anteriormente al cultivo del plátano, porque cualquier sea el nivel de intensificación, el rendimiento queda relativamente bajo, en relación con el deterioro del estado sanitario, en comparación con otros cultivos precedentes.

La implementación de una experimentación en estación de investigación muestra que a escala de un año, las tres prácticas innovadoras ensayadas ayudan en mantener un suelo de buena calidad. Las plantas sanas "PIF" tienen un mejor estado de salud (ausencia de nemátodos fitoparásitos en las raíces), y ocasionan un aumento significativo del rendimiento. La planta de servicio *P. notatum* ayuda con el control de las malezas, de las plagas del suelo y el aumento de la actividad biológica del suelo asi como el rendimiento del plátano. El compost de lombriz contribuye al mantenimiento de una mejor calidad de suelo, permitiendo la regulación de las poblaciones de nemátodos fitoparásitos del plátano. La reducción de la labranza, el saneamiento de los suelos (con un barbecho o une cultivo de piña) y las prácticas culturales innovadoras son excelentes alternativas agrícolas al uso de productos químicos en la lucha contra las plagas del suelo. La continuación de este trabajo consistirá en evaluar las limitaciones técnico-económicas de la implementación de éstas prácticas agroecológicas innovadoras en las fincas, con vista de medir su adoptabilidad por los agricultores.

Palabras clave : Agregados de Suelo, agroecología, plátano, gorgojos, diagnóstico, la sostenibilidad, encuesta agroambiental, fertilización, Micorriza, nemátodos fitoparásitos, calidad del suelo, planta de servicio, lombricompost, rendimiento, salud de la planta, Sigatoka, sistemas de cultivo.

AVANT-PROPOS

Face aux nombreux défis liés à la sécurité alimentaire auxquels les agriculteurs en particulier et la population en général doivent faire face, nous n'avons plus droit à l'erreur. Afin d'assurer notre survie, il est d'importance vitale pour nous d'innover en ce qui concerne notre méthode de production et de consommation « Clifford Vellien »

Face à un système qui confisque le droit des peuples à se nourrir par eux-mêmes, l'agroécologie est une alternative éthique et réaliste, un acte de légitime résistance, qui permet l'autonomie des populations et la préservation de leurs patrimoines nourriciers. Répondre aux nécessités de notre survie tout en respectant la vie sous toutes ses formes est à l'évidence le meilleur choix que nous puissions faire, et c'est ce que préconise et applique concrètement l'agroécologie « Pierre Rabhi ».

Dans un monde agricole soumis à des contraintes environnementales et économiques croissantes, l'*Homo agricolus* et l'*Homo scientificus* explorent ensemble de nouvelles voies pour produire mieux et durablement. C'est dans ce contexte que cette thèse a été lancée au sein de l'Unité de Recherche Agrosystèmes Tropicaux (UR ASTRO) de l'NRA des Antilles et de la Guyane. Ce programme a été mené simultanément dans deux régions de la Caraïbe : la Guadeloupe et Haïti, où la culture du plantain est fortement présente, mais fragilisée par des maladies et ravageurs telluriques. Il nous a ainsi permis d'élargir le cadre d'étude au profit d'une lecture de la diversité des systèmes de culture plantains dans ces deux régions.

Ce rapport de thèse comporte deux grandes parties :

i) le développement de concepts et principes pour la conduite d'un *diagnostic agro-écologique* adapté à la culture du plantain dans son contexte technique et environnemental - La méthodologie mise en œuvre pour réaliser ce diagnostic s'appuie sur des travaux conduits dans d'autres régions et pour d'autres cultures par des chercheurs comme Velasquez et al. (2007), Altieri & Nicholls (2003), Vilain *et al.* (2003), Solagro (2002), Bockstaller & Girardin (2003) ;

ii) la mise en œuvre d'une *expérimentation* en station expérimentale pour tester trois pratiques innovantes pour la banane plantain face à d'autres pratiques dites conventionnelles *i.e.* recourant à l'application de produits de synthèse.

La première partie de mon programme, le diagnostic agronomique a été réalisé sur les deux régions d'étude. En revanche, pour des raisons logistiques, l'expérimentation semi-contrôlée en plein champ a été conduite uniquement en Guadeloupe.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... A
RÉSUMÉ C
ABSTRACT ..... D
RESUMEN ..... E
AVANT-PROPOS ..... F
TABLE DES MATIÈRES I
TABLE DES FIGURES III
LISTE DES TABLEAUX IV
LISTE DES ANNEXES V
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
PARTIE I : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE 6
I.1- AGRONOMIE DU BANANIER PLANTAIN *6*
I.1.1- Physiologie du bananier plantain *6*
I.1.2- Les systèmes de culture à base de plantains dans la caraïbe : cas de la Guadeloupe et de Haïti *7*
I.1.3- Principaux bioagresseurs telluriques *10*
I.2. LE COMPARTIMENT SOL *17*
I.2.1- Le sol : réservoir de la vie souterraine *17*
I.2.2- La matière organique *18*
I.3. LES PLANTES DE SERVICE : RENFORCEMENT DE LA BIODIVERSITÉ VIA LES ASSOCIATIONS DE CULTURES *20*
I.4. CADRAGE DE LA RECHERCHE *22*
I.4.1- Question de recherche *22*
I.4.2- Hypothèses de travail, Objectifs et démarche méthodologique *23*
I.5- DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE 25
I.5.1- Diagnostic agronomique versus diagnostic agro-écologique *25*
I.5.2- Diagnostic agro-Écologique des systÈmes de culture à base de plantains *26*
I.6- « L'EXPERIMENTATION SYSTEME » COMME CADRE CONCEPTUEL POUR LE TEST DE PRATIQUES INNOVANTES *36*
PARTIE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES 39
II.1. GEOGRAPHIE ET CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DES ZONES D'ETUDE *39*
II.2. DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE *42*
II.2.1- Enquête agri-environnementale *42*
II.2.2- Choix des parcelles pour le diagnostic agro-écologique *42*
II.2.3- Dispositif d'échantillonnage *44*
II.2.4- Échantillonnage des indicateurs de la qualité du sol *44*
II.2.5- Analyses des échantillons au laboratoire *46*
II.2.6- Problèmes phytosanitaires aériens et telluriques *50*
II.2.7- Niveau de productivité de la parcelle *51*
II.3. L'EXPÉRIMENTATION SEMI-CONTROLEE EN CHAMP *53*
II.3.1- Site expÉrimental, pédologie, climat *53*
II.3.2- Dispositif expérimental *53*
II.3.3- Élaboration du pré-compost et du vermicompost *55*
II.3.4- Préparation du sol : labour *56*
II.3.5- Matériel végétal *57*
II.3.6- Suivi de l'expérimentation *59*

II.4- Analyse statistique *60*

PARTIE III : RÉSULTATS 63

III.1- ENQUETES AGRO-ENVIRONNEMENTALES EN GUADELOUPE ET EN HAÏTI 63

III.2- DIAGNOSTIC AGRO-ECOLOGIQUE 65

III.2.1- En Guadeloupe *65*

III.2.2- En Haïti *74*

III.3- EXPERIMENTATION SEMI-CONTROLEE *77*

III.3.1- Influence des pratiques innovantes sur la fertilité du sol *77*

III.3.2- Influence des pratiques innovantes sur la composante « rendement » du plantain *80*

III.3.3- Influence du niveau d'intensification sur la fertilité et la productivité du plantain *81*

PARTIE IV : DISCUSSION 84

IV.1- LES ENSEIGNEMENTS DU DIAGNOSTIC AGRO-ECOLOGIQUE REALISE EN GUADELOUPE ET EN HAÏTI *84*

IV.1.1- Effets des systèmes de culture et pratiques culturales sur la fertilité du sol *84*

IV.1.2- Effets des systèmes de culture et des pratiques culturales sur l'état sanitaire de la plante *88*

IV.1.3- Effets des systèmes de culture sur le rendement du plantain *92*

IV.2- EXPERIMENTATION SUR LES PRATIQUES INNOVANTES EN STATION DE RECHERCHE *96*

IV.2.1- Influence des pratiques innovantes sur l'activité biologique et la fertilité du sol *96*

IV2.2- Influence des pratiques innovantes sur la productivité du plantain *99*

IV.2.3- Influence du niveau d'intensification sur les composantes de la fertilité du sol et le rendement du plantain *100*

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 102

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 107

ANNEXES 1

TABLE DES FIGURES

Figure 1 *: Productions et surfaces plantées en plantain en Guadeloupe et en Haïti de 1993 à 2012.... 9*
Figure 2 *: Rôle des macro-invertébrés du sol dans l'écosystème terrestre 31*
Figure 3 : *Image satellite situant Haïti et la Guadeloupe dans l'Arc Antillais 39*
Figure 4 : *Carte des sols de Guadeloupe (d'après Cabidoche, 1997) 41*
Figure 5 *: Carte géologique d'Haïti (d'après bureau des mines et de l'énergie d'Haïti) 42*
Figure 6 *: Dispositif d'échantillonnage suivant un W délimitant les 5 points de prélèvements..... 44*
Figure 7 *: Les étapes de l'échantillonnage macrofaune / racines / sols avec le cadre 25*25*20cm... 45*
Figure 8 *: Échantillonnage macrofaune A/B avec le cadre 25*25*10cm 45*
Figure 9 *: Cylindre d'échantillonnage des agrégats du sol (la morphologie du sol)..... 46*
Figure 10 *: Les étapes d'extraction de nématodes du sol par élutriation et filtration Baerman..... 47*
Figure 11 *: Les étapes d'extraction de nématodes des racines du plantain 48*
Figure 12 *: Les étapes d'extraction et comptage de spores de mycorhizes 49*
Figure 13 *: Différentes étapes de l'analyse morphologique des agrégats du sol..... 49*
Figure 14 *: Nécroses foliaires dues à la Cercosporiose noire dans une plantation en Haïti..... 50*
Figure 15 *: Vue d'une coupe transversale d'un bulbe infesté par les larves de charançon..... 51*
Figure 16 *: Vue de la récolte du 1er cycle de l'expérimentation semi-contrôlée..... 52*
Figure 17 *: Comparaison du rendement réel expérimental au rendement estimé 53*
Figure 18 *: Dispositif expérimental, distribution aléatoire des traitements en plein champ 54*
Figure 19 *: Les étapes d'élaboration du pré-compost et du vermicompost 55*
Figure 20 *: Évolution de la température dans le tas du pré-compost mesurée par 2 thermocouples.. 56*
Figure 21 *: Résumé des étapes de la technique PIF et préparation des baïonnettes par pralinage.... 58*
Figure 22 *: Plante de service « P. notatum» 59*
Figure 23 *: Station météologique en station expérimentale 60*
Figure 24 : *Répartition des précédents culturaux au sein des systèmes de culture plantains en Guadeloupe 63*
Figure 25 *: Répartition des précédents culturaux au sein des **s**ystèmes de cultures plantains en Haïti. 64*
Figure 26 *: Impact des couples « précédents / niveau d'intrants » sur la productivité du plantain..... 71*
Figure 27 *: Effets des couples « précédent/niveau d'intrants » sur le rendement du plantain en Haïti.. ..... 76*
Figure 28 *: Influence du P. notatum (PN) versus herbicides (HB) sur les 3 sous composantes du rendement.…**Erreur ! Signet non défini.***
Figure 29 *: Influence du type de fertilisation et des apports de nématicides sur les 3 sous composantes du rendement. 80*
Figure 30 *: Influence du P. notatum (PN) vs. herbicides (HB) sur les 3 sous composantes du rendement. 81*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 *: Comparaison des modes de production du plantain en Guadeloupe et en Haïti* _____ *10*

Tableau 2 *: Comparaison des caractéristiques des 2 régions d'étude :* _____ *40*

Tableau 3*: Enquête agri-environnementale réalisée dans les deux zones d'étude* _____ *42*

Tableau 4 *: Les critères retenus pour le choix des parcelles* _____ *43*

Tableau 8 *: Présentation des variables des composantes du sol dans les deux régions d'étude* ____ *44*

Tableau 6 : *Description des 8 traitements de l'expérimentation* _____ *53*

Tableau 7 *: Analyses chimiques du sol à T0 avant la plantation. ES : Erreur Standard.* _____ *57*

Tableau 8 *: abondance de nématodes par 100g de sol à T0 avant la plantation* _____ *57*

Tableau 9 *: Les impacts des couples « précédent/niveau d'intrants » sur les variables des 4 sous-composantes de la fertilité du sol* _____ *69*

Tableau 10 *: Impacts du couple précédent/pratiques culturales sur l'abondance des variables représentatives des 4 sous-composantes de la fertilité du sol* _____ *70*

Tableau 11 *: Modèles linéaires estimant le rendement par les variables de la fertilité du sol* _____ *72*

Tableau 12 *: Présentation des modalités donnant le meilleur résultat des effets (positif ou négatif) des techniques culturales sur les variables de la qualité du sol et du rendement* _____ *73*

Tableau 13 *: Impacts des pratiques sur les variables représentatives de la fertilité du sol* _____ *75*

Tableau 14 *: Influence des pratiques innovantes* ***(PI)*** *sur la composante «fertilité du sol »* _____ *79*

Tableau 15 *: Influence du niveau d'intensification sur la fertilité du sol et le rendement* _____ *82*

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Guide d'enquête-diagnostic agro-environnemental

Annexe II : Protocole de diagnostic agro-ecologique de la culture de banane plantain

Annexe III : Fiche de renseignement des 23 parcelles diagnostiquées en guadeloupe

Annexe IV : Fiche de renseignement des 12 parcelles diagnostiquées en haïti

Annexe V : Interventions faites sur la parcelle expérimentale

Annexe VI : Diagnostic agro-écologique en guadeloupe

Annexe VII : Diagnostic agro-écologique en haïti

Annexe VIII : Expérimentation semi-contrôlée en champ

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le bananier plantain (*Musa paradisiaca*, AAB) représente une ressource alimentaire de premier ordre en zone tropicale. Sa culture joue un rôle socio-économique important pour les pays en voie de développement des zones tropicales et subtropicales (Frison *et al.*, 1998 ; Lassoudière, 2007). Elle génère une source de revenus importante pour les pays producteurs (Tchango *et al.*, 1998) et constitue l'alimentation de base de plus de 400 millions de gens vivant dans de nombreux pays en développement, notamment en Afrique, en Amérique Latine et dans certaines régions de la Caraïbe (CIRAD & INIBAP, 1998 ; Lassoudière, 2011). Sa production mondiale est estimée en moyenne à 37 162 205 tonnes métriques en 2012 dont 1 665 429 tonnes métriques pour la Caraïbe (FAOSTAT, 2014). Cette production de plantains est largement consommée et vendue localement (FAOSTAT, 2008 ; Lescot, 2008), ce qui contribue à la souveraineté et à la sécurité alimentaire durable des pays défavorisés.

En Guadeloupe, contrairement à la banane dessert d'exportation qui représente un des piliers économiques des Antilles Françaises (Houdart *et al.*, 2009), la banane plantain fait partie des cultures de diversification et joue un rôle non négligeable dans l'alimentation quotidienne des guadeloupéens (Tremblay, 2003). Sa production est estimée à 8 000 tonnes métriques en 2012 (FAOSTAT, 2014). En Haïti, cette culture constitue l'une des principales bases alimentaires pour la population, avec une consommation comprise entre 22 Kg/hab/an à 60 Kg/hab/an dans les régions productrices (Freguin, 2005). Avec 267 000 tonnes métriques de production en 2012 (FAOSTAT, 2014), Haïti reste l'un des principaux pays producteurs de la zone Caraïbe (INIBAP, 1999).

Cependant, aux Antilles comme partout ailleurs dans le monde, la culture du plantain se heurte à de nombreuses contraintes, principalement d'ordre sanitaire (Cercosporiose jaune et noire, nématodes, charançons, …) qui sont vraisemblablement dues à l'intensification des pratiques culturales (*labour, replantation fréquente, fertilisation chimique et traitements phytosanitaires*) dans les systèmes de culture plantain. Ces pratiques sont susceptibles d'entraîner un dérèglement dans les réseaux trophiques qui se traduirait par le développement de bioagresseurs dont la régulation « naturelle » est affaiblie par la réduction des régulateurs biologiques prédateurs ou parasites (auxiliaires) (Lavelle, 2002). Face aux bioagresseurs telluriques auxquels sont exposés les systèmes monoculturaux à base de plantains en Guadeloupe et en Haïti, il n'existe pas de solution immuable et universelle mais, un grand nombre de solutions possibles qui se doivent d'être adaptatives (Meynard *et al.*, 2001).

Depuis des décennies, la lutte contre ces bioagresseurs se fait essentiellement via l'utilisation massive (souvent abusive) de produits de synthèse chimique, source de contamination de l'environnement (pollution des sols et des eaux, disparition de la biodiversité domestique et des auxiliaires, …) et de risques pour la santé humaine dans le monde (Quénéhervé, 1990, Lacher & Goldstein, 1997 ; Horrigan *et al.*, 2002 ; Dinham & Malik, 2003 ; Gowen *et al.*, 2005 ; Maroni *et al.*, 2006). À ce jour, cette lutte chimique n'est plus envisageable face aux normes françaises visant à produire plus tout en réduisant de moitié les apports en intrants chimiques à l'horizon 2018 selon le « Plan Ecophyto 2018 » (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, 2010). Aussi, les enjeux environnementaux, auxquels doivent faire face l'agriculture mondiale, remettent en question les modes de productions conventionnels (Milenium Ecosystem Assessment, 2005 ; Grenelle, 2008), d'où la nécessité pour la recherche agronomique de proposer des alternatives visant la diminution, voire la suppression de ces produits de synthèse. Pour répondre aux enjeux liés au respect de l'environnement et de la santé humaine, les chercheurs - agronomes et écologues, en particulier, en collaboration avec les agriculteurs, explorent de nouvelles voies pour une production à faibles niveaux d'intrants chimiques.

A titre d'exemple, plusieurs alternatives ont été proposées pour lutter contre les bioagresseurs telluriques dans les plantations de banane export (Quénéhervé, 2008 ; Chabrier *et al.*, 2010 ; Tixier *et al.*, 2010 ; Dorel *et al.*, 2011 ; Djigal *et al.*, 2012). Ces alternatives comportent : i) les mesures prophylactiques visant à réduire la contamination des champs via l'utilisation de vitro-plants et ii) l'assainissement des sols via une période de jachère, de rotation et/ou associations culturales avec des plantes non hôtes de nématodes. Ces plantes peuvent être des cultures de rente (ananas, canne à sucre...,) ou des plantes de service à propriétés nématorégulatrices ou fixatrices d'azote et/ou de contrôle de la flore adventice (Djigal *et al.*, 2012 ; L'Etang, 2012).

Bien que ces alternatives concernent la banane d'exportation, elles pourraient être facilement adoptées dans les systèmes de culture plantains. Toutefois, la transposition de la technique de la vitro-culture au bananier plantain n'est pas complètement opérationnelle du fait de la stimulation de virus inclus dans le génome du bananier plantain (Dallot *et al.*, 2001 ; Gayral et al, 2008 ; Iskwa-Caruana *et al.*, 2014). Il importe de préciser que les vitro-plants du plantain sont aussi beaucoup plus sensibles au virus de la mosaïque du concombre (CMV) que les plants issus de rejets ou de fragments de souche (Sarah *et al.*, 1990). De même, le virus de

la mosaïque en tirets (BSV) semble infecter les vitro-plants plus facilement que les autres types de matériel végétal (Diekmann & Putter, 1996). Par conséquent, la culture de tissus peut parfois multiplier l'incidence d'une affection virale beaucoup plus rapidement qu'une méthode de propagation conventionnelle ou que la diffusion du vecteur. Eu regard à ce qui précède, il apparait nécessaire de concevoir, pour la banane plantain, d'autres moyens de multiplication des plants sains indemnes de parasites.

Ainsi, dans la recherche de nouvelles techniques culturales pour la lutte contre ces bioagresseurs, la technique PIF (Plants Issus de Fragments de tiges) a été mise au point par des chercheurs camerounais du CARBAP « African Research Centre on Banana and Plantain » (Kwa, 2003 ; Lefranc *et al.*, 2010). Grâce à cette technique, il est possible de produire un matériel végétal sain issu de fragments de tiges de bananiers plantains. Ce matériel végétal peut jouer un rôle déterminant dans la durabilité des plantations face aux bioagresseurs telluriques. Il est à noter que l'efficacité de ce matériel végétal, indemne de nématodes, pourrait être renforcée s'il est planté dans un sol préalablement assaini (par jachère notamment ; Mateille *et al.*, 1992).

Dans le cadre de cette étude, nous essayerons de comprendre les effets des systèmes de culture à base de plantains sur : i) la production du plantain, ii) la durabilité des plantations, via leurs impact sur la fertilité des sols à moyen terme. Les variables de l'écologie du sol, telles que la teneur en matière organique, l'abondance et la diversité de macrofaune, l'abondance de spores de mycorhizes ainsi que le degré de la pression parasitaire tellurique considérés comme indicateurs de cette durabilité, sont particulièrement étudiées.

L'enjeu consiste : i) à construire un outil de *diagnostic agro-écologique* permettant d'identifier, à travers l'analyse de situations contrastées (pratiques culturales plus ou moins intensives), les caractéristiques des systèmes de culture qui ont un rôle déterminants sur la structuration de la fertilité (physique, chimique, biologique et morphologie) du sol ; ii) dans un deuxième temps, à tester en conditions réelles des *pratiques agro-écologiques innovantes* qui seront envisagées à l'issue du diagnostic agro-écologique. À ce jour, il existe très peu de références sur la diversité des modes de conduite paysans et leurs effets sur le rendement et la fertilité des sols à long terme, impactant la durabilité des plantations, dans les zones d'intervention de notre étude, que sont la Guadeloupe et Haïti.

Pour les Antilles Françaises, le manque de connaissances sur cette culture vient du fait que le plantain ne jouit pas de la même notoriété que la banane export. Avec sa faible production, le plantain est classé en 4ème position parmi les principales cultures sur l'île. C'est

probablement pour cette raison que, jusqu'à présent, les travaux de recherche ont été principalement consacrés à la banane export, constituant la deuxième culture de rente en Guadeloupe derrière la canne-à-sucre.

Bien qu'Haïti soit l'un des plus gros producteurs de plantain de la Caraïbe, les recherches portant sur les problèmes agronomiques relatifs à cette culture se sont limitées aux rapports des projets pilotés par le Ministère de l'Agriculture, des ONGs et des mémoires de stages. Une étude a été engagée en 1998 pour faire état des problèmes liés à la production du plantain (Lescot & N'Guyen, 1998), et une thèse a eu pour objectif de *« comparer les transformations des systèmes agraires et les dynamiques d'échanges transfrontaliers entre Haïti et la République Dominicaine - sur la filière banane plantain* **»** (Freguin, 2005). À ce jour, des enjeux forts reposent sur la recherche des solutions face aux contraintes phytosanitaires imposées par les bioagresseurs aériens et telluriques ravageant les plantations de plantains dans les zones concernées.

Suite à ces constatations, l'une de nos priorités a consisté à rechercher des alternatives agro-écologiques visant à réguler la pression parasitaire et favoriser le développement des systèmes de culture plantains durables et plus respectueux de l'environnement. Ce travail a donc pour finalité de contribuer à la sécurité, la souveraineté et l'indépendance alimentaire des pays producteurs de plantains dans la Caraïbe (particulièrement en Haïti), en améliorant les performances et la résilience des systèmes de culture.

PARTIE I : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

PARTIE I : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

I.1- AGRONOMIE DU BANANIER PLANTAIN

I.1.1- PHYSIOLOGIE DU BANANIER PLANTAIN

Originaire de l'Asie du Sud-Est (Chine), le bananier plantain fait partie des bananes à cuire. Comme le bananier dessert, le plantain est une herbe géante (4 à 6 mètres de haut) monocotylédone vivace de la famille des Musacées. Il appartient au sous groupe triploïde « AAB » et comporte plus de 150 cultivars (Lassoudière, 2007). Il est cultivé dans plus de 120 pays dans le monde (Strosse *et al.*, 2006). Selon la variété, le cycle du bananier plantain varie entre 12 à 15 mois pour le premier cycle, puis cette durée diminue pour les cycles suivants (Lescot, 1995). Moins le bourgeon mâle est important, plus le nombre de doigts est faible et le poids du fruit élevé (Lassoudière, 2007). On distingue classiquement : i) le type « *French* » (partie mâle normale, nombreuses mains, doigts moyens) encore appelé « *banane blanche* » en Guadeloupe et « *banane musquée* » en Haïti ; ii) le type « *Corne* », variété intermédiaire (une fleur terminale, pas de fleurs intermédiaires) et iii) le type « *Faux corne* » (avec des fleurs hermaphrodites, quelques mains, gros doigts) appelé « *banane cochon* » en Haïti.

Pour des raisons climatiques, cette culture est concentrée en Afrique, en Amérique Latine et dans les Caraïbes (Infomusa, 2001). Les principaux producteurs du plantain dans la Caraïbe insulaire sont Cuba, la République Dominicaine, et Haïti avec respectivement 689 504, 543 461, et 267 000 tonnes métriques en 2012 (FAOSTAT, 2014).

La culture du plantain requiert des conditions édaphiques qui favorisent le bon développement de la plante (Dorel, 1990 ; Lescot, 1995). Les caractéristiques structurales et texturales du sol (ni trop sableux, ni trop argileux) y jouent un rôle fondamental. La culture du plantain requiert des sols meubles, relativement profonds, peu caillouteux, bien aérés et riches en matière organique, de manière à permettre un développement optimal des racines. Les valeurs optimales de l'intervalle de pH permettant la croissance du bananier seraient entre 5,6 et 7,5 (Sys *et al.*, 1993). Les sols lourds, peu drainés, à pH < 5, à faible teneur en matière organique ou encore à faible capacité d'échange cationique sont peu propices à la culture du plantain (Lescot, 1995).

Mentionnons en outre que le bananier est une plante héliophile, qui nécessite une insolation de 2000 à 2400 h/an (seuil limite : 1500 à 1800 h/an). La température idéale pour son développement se situe autour de 28°C (entre 15 et 16°C, il y a arrêt de la croissance ; Lescot, 1995). Il se développe sur des altitudes variées allant jusqu'à 1800 m au dessus du

niveau de la mer. Sa culture est très exigeante en eau (Lescot, 1995) puisqu'elle requiert une hauteur d'eau variant de 25 à 70 mm par semaine (soit 1300 à 3600 mm/an ; Swennen & Vuylsteke, 2001).

I.1.2- LES SYSTÈMES DE CULTURE À BASE DE PLANTAINS DANS LA CARAÏBE : CAS DE LA GUADELOUPE ET DE HAÏTI

I.1.2.1- NOTION DE SYSTÈME DE CULTURE

Sebilotte (1990, 1993) propose la définition suivante : « un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par : i) la nature des cultures et leur ordre de succession ; ii) les itinéraires techniques[1] appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues ». La notion de *système de culture* s'applique également à la manière de conduire des cultures et des successions culturales en interaction avec le milieu biophysique et socio-économique. Il s'agit donc clairement d'une conceptualisation par l'agronome de ce que pratique l'agriculteur sur des parcelles cultivées de manière identique.

Ces systèmes peuvent être étudiés à des échelles variées (Meynard, 1992), mais dans notre cas, on s'intéressera à l'échelle de la parcelle au sein de laquelle, les *itinéraires techniques* appliqués ne sont pas indépendants. Soulignons que, l'effet d'une technique est en lien avec les effets des autres techniques. Par exemple, l'efficacité d'un apport d'engrais dépendra de la gestion des parasites, du travail du sol, de l'irrigation qui va jouer sur le régime hydrique, la biologie, la chimie et la structuration du sol. On ne peut donc pas les raisonner indépendamment. Les approches d'expérimentation où l'on fait varier chaque technique indépendamment des autres, n'ont ainsi qu'une valeur analytique en amont du travail de conception de systèmes de culture. Elles ne débouchent pas, en général, sur des résultats directement opérationnels chez les agriculteurs.

A cet effet, le système de culture est un concept qui permet d'étudier la façon dont évolue un espace cultivé sur plusieurs années, tout en intégrant la durée dans l'analyse des situations culturales (Lacoeuilhe, 1996). Dans les régions tropicales, nous retrouvons différents systèmes de culture plantains : i) les jardins privés (jardins créoles) et les petites fermes ; ii) les cultures associées (avec le cacao, le café, certains palmiers, des arbres fruitiers,

[1] **Itinéraire technique** : L'itinéraire technique, défini comme "une combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée" (Sebillotte, 1974, 1978).

des plantes à tubercules ou maraîchères, des haricots, du gombo,…) et iii) les cultures intensives (Lescot, 2006).

I.1.2.2- Comparaison des systèmes de culture plantains de Guadeloupe et de Haïti

Si l'on fait un focus sur la production et les surfaces plantées en plantains à l'échelle mondiale au cours de ces deux dernières décennies (1993-2012), l'analyse des données de rendement montre que la production et les surfaces plantées passent, respectivement, de 27 328 455 tonnes et 4 655 555 Ha en 1993 à 37 162 205 tonnes (soit 26% de plus) et 5 407 361 Ha (soit 14% de plus) en 2012 (FAOStat, 2014).

En analysant la production et les surfaces cultivées en plantain dans l'ensemble de la zone Caraïbe, on a constaté une nette augmentation de celles-ci pour cette même période (1993-2012). En effet, la production totale du plantain enregistrée par FAO (FAOSTAT, 2014), a passé de 1 105 328 tonnes et 149 694 hectares en 1993 à 1 665 429 tonnes (soit 34% de plus) et 167 230 hectares (soit 10,5% de plus) en 2012. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés au niveau mondial.

Parallèlement à l'échelle mondiale et caribéenne, lorsqu'on réalise une analyse beaucoup plus fine de cette production à l'échelle régionale (Guadeloupe et Haïti notamment), pour cette même période (1993-2012), on observe à peu près la même tendance (fig. 1). Selon les statistiques de la FAO (FAOSTAT, 2014), la plus forte production du plantain enregistrée, en vingt ans, en Guadeloupe et en Haïti a été estimée respectivement à, 11 925 tonnes métriques en 2003, et 364 500 tonnes métriques en 2009. La production haïtienne a été plus ou moins maintenue entre 270 000 tonnes en 1993 et 267 000 tonnes en 2012. Tandis que, la production guadeloupéenne a été revue à la hausse, soit 6878 tonnes en 1993 contre 8000 tonnes en 2012 (soit 14% de plus).

L'augmentation de cette production en Guadeloupe peut être due à une augmentation de la fréquence de replantation liée à une reconversion de certains producteurs de banane dessert en plantain (comme culture de diversification). Toutefois, en Haïti, cette augmentation de production est certainement due à une plus forte replantation des parcelles après le passage d'une tempête tropicale (*Fay*) et de trois ouragans (*Gustav*, *Hanna* et *Ike*) pendant l'année 2008 sur l'île. En effet, les surfaces cultivées en plantain ont varié très peu pour ces deux régions.

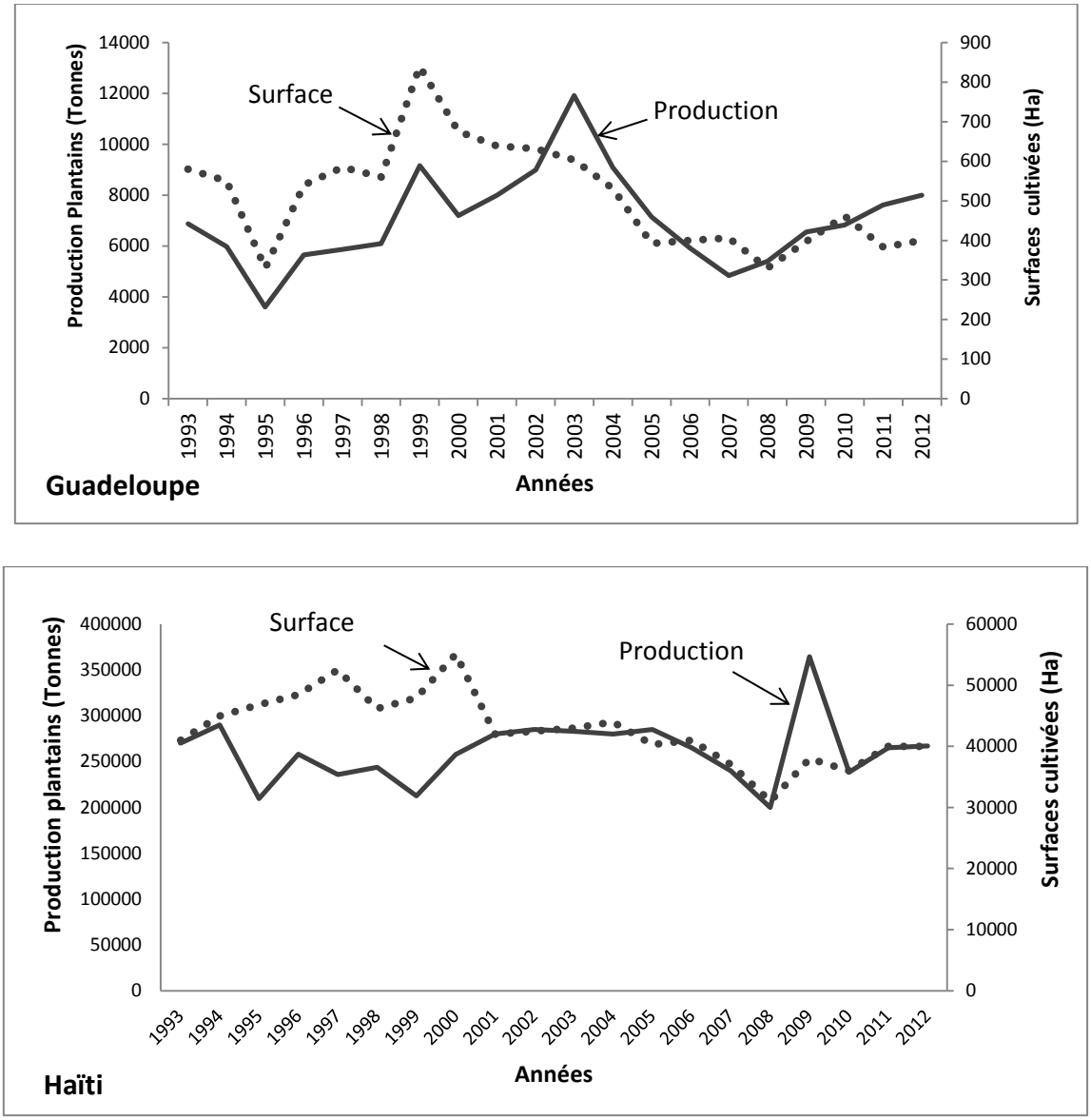


Figure 1 : Productions et surfaces plantées en plantain en Guadeloupe et en Haïti de 1993 à 2012.

Le tableau 1 ci-après présente une comparaison non exhaustive entre les systèmes de culture plantains des deux zones d'intervention de notre étude. Ce tableau nous montre que les systèmes de culture plantains dans ces deux régions se différencient entre eux par certains critères et convergent sur d'autres. Par exemple les contraintes sont plus importantes en Haïti qu'en Guadeloupe.

Tableau 1 : Comparaison des modes de production du plantain en Guadeloupe et en Haïti

	Guadeloupe	Haïti
Production	Production du plantain représente 10% des Musacées aux Antilles (Fruitrop, 2006)	Un des plus gros producteurs de la Caraïbe (avec 16% de la production en 2012), à côté de Cuba (41%) et République Dominicaine (32%), (FAOSTAT, 2014)
Pratiques culturales	**Jardins créoles** : Apport très faible en engrais chimiques, travail du sol réduit, apport de matière organique ; **Monoculture ± intensive** : techniques ± modifiées de banane export ; **Cultures associées** : tubercules, giraumon, maïs, pastèque, pois…, **Cultures de rotation :** ananas, patate douce, maraichage, igname…,	**Jardins créoles** : sans labour et sans aucun apport d'intrants chimiques **Monoculture ± intensive** : Faible apport de nématicides/insecticides et/ou d'engrais chimiques ; **Cultures associées** : pois d'angole ou pois congo, haricots, gombo, aubergine, tomate, manioc, papayer… ; **Rotation avec** : canne-à-sucre, manioc, patate douce, sorgho, maïs, riz, café, cacao…, (Freguin, 2005)
Pédologie /Localisation	La culture de bananiers dessert et plantains concentrée dans le Croissant bananier à Basse Terre (fig. 3 plus bas) Type de sol : andosols, ferralsols, vertisols Climat tropical humide, pluviométrie entre 1200-2000mm	La culture de plantains concentrée dans les aires détenant une pluviométrie annuelle allant de 1200 à 1600 mm. ex : Plaine de l'Arcahaie et Cabaret : (surface de production > 70% (Lescot & N'Guyen, 1998) Type de sol : alluvions
Contraintes	*Socio-économique et Agronomiques* : **Production** : destinée à la vente, un très faible pourcentage autoconsomée. Elle représente la totalité des revenus pour les petits exploitants et une petite partie des revenus des grands exploitants agricoles dont la principale culture est la banane dessert **Maladies aériennes :** Cercosporiose noire (apparue récemment en 2011) **Ravageurs telluriques :** nématodes phytoparasites, charançons **Problèmes climatiques** : rafales de vent, tempêtes, cyclones	*Socio-économique et Agronomiques* : **Production** : destinée à la vente, un très faible pourcentage autoconsomée **Maladies aériennes** : Cercosporiose noire apparue depuis 1990, virus de la mosaïque en tirets ou ***Banana streak virus*** (BSV), maladie du Moko causée par « *Ralstonia solanacearum* », *Fusarium oxysporum* **Ravageurs telluriques :** nématodes phytoparasites, charançons **Problèmes climatiques** : rafales de vent, tempêtes, cyclones, sécheresses

I.1.3- PRINCIPAUX BIOAGRESSEURS TELLURIQUES

À côté de la Cercosporiose noire, le parasitisme tellurique représente la principale contrainte pour la culture du bananier (Tixier, 2004). Parmi ces parasites, nous pouvons citer notamment les charançons et les nématodes phytoparasites.

Le **charançon noir** « *Cosmopolites sordidus* Germa» (coléoptère, Curculionidae) est un insecte foreur (Viladebó, 1984) ayant une grande longévité (plus de 2 ans, Frogatt, 1925), mais une faible fécondité (la femelle pond quelques œufs par semaine dans le bulbe du bananier, Koppenhofer, 1994). Après l'éclosion des œufs, les larves creusent des galeries dans ce bulbe, endommageant les points d'insertion des racines primaires. Il en résulte la fragilité des plants qui sont prédisposés à la verse et aux troubles trophiques. *C. sordidus* sévit dans la

majorité des pays producteurs de bananes plantains. Il est d'instinct grégaire avec un mode de vie nocturne et essentiellement fouisseur (Dorel *et al.*, 2011). Il importe de noter que cet insecte, à dispersion lente et limitée (déplacements par la marche entre 30 cm et 10 m/nuit pour certains individus, Dorel *et al.*, 2011), contamine les cultures de plantains par l'intermédiaire de plants contaminés, à partir des populations résiduelles provenant de précédents de culture, ou encore par colonisation (migration à partir des parcelles voisines, Tixier *et al.*, 2010). Quoi que l'adulte dispose d'ailes fonctionnelles, il est très rarement observé en vol (Lemaire, 1996).

Les **nématodes phytoparasites** sont des petits vers ronds (microscopiques pour la plupart) dont la taille selon les espèces va de 100µm à 4 ou 5 mm de long (Chaussod, 1996). Ils constituent un embranchement de vers non segmentés et sont classés parmi les ecdysozoaires (métazoaires recouverts d'une cuticule). Ils se nourrissent de bactéries de champignons ou du contenu des cellules végétales (nématodes phytophages, Chaussod, 1996). Les principaux nématodes agents de nécroses racinaires et bulbaires des bananiers sont les espèces endoparasites *Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae,* auxquelles sont associées d'autres espèces des genres *Meloïdogyne* (nématode à galle, semi-endoparasite) et *Helicotylenchus* (nématode spiralé, ectoparasite), (Sarah, 1989 ; Gowen & Quénéhervé, 1990). Ces nématodes s'alimentent et se reproduisent aux dépens des plantes (Siddiqui, 1986). C'est pourquoi, ils sont impliqués dans la fragilisation des racines primaires et secondaires entrainant la réduction de la nutrition hydro-minérale et le phénomène de verse du bananier (affaiblissement du système d'ancrage).

I.1.3.1. Vers des méthodes alternatives à l'usage des pesticides

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les méthodes de lutte classiquement utilisées contre ces bioagresseurs telluriques consistent en l'utilisation massive des produits phytosanitaires (Ganry, 2004). Compte tenu de la rémanence de ces produits toxiques, de telles pratiques sont à l'origine d'une charge polluante importante au niveau de l'environnement (pollution des sols, des eaux et sédiments des rivières, nappes phréatiques, disparition de la biodiversité domestique, diminution de la faune édaphique), (Kermarrec, 1979 ; Dorel *et al.*, 1996 ; Bonan & Prime, 2001, Olvera-Velona *et al.*, 2003 ; Ganry, 2004). Ces pesticides ont également un effet avéré sur la santé humaine (Quénéhervé, 1990 ; Van Wendel de Joode *et al.*, 1996, 2001 ; Lacher & Goldstein, 1997 ; Slutsky *et al.*, 1999 ; Gowen *et al.*, 2005 ; Polidoro *et al.*, 2008 ; Douglas *et al.*, 2011).

En conséquence, les méthodes de lutte conventionnelles sont de plus en plus remises en question et soumises à des contraintes réglementaires françaises et européennes de plus en plus drastiques (Gowen *et al.*, 2005). C'est dans ce contexte qu'en 2010, le Plan ECOPHYTO 2018 a vu le jour. Son objectif est de produire plus, tout en réduisant de moitié les apports en intrants chimiques à l'horizon 2018 (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, 2010). Par ailleurs, selon le constat qui a été fait par Griffon (2003), la population mondiale risquerait d'atteindre neuf milliards d'habitants en 2050. Face à ce double enjeu, l'agriculture moderne doit, en conséquence, garantir la protection de l'environnement, la confiance des consommateurs ainsi que la durabilité[2] et la résilience[3] des systèmes de culture. Pour y parvenir, les agronomes et les écologues se doivent de développer des méthodes alternatives agro-écologiques, plus productives et respectueuses de l'environnement.

Parmi la gamme des méthodes alternatives qui ont été développées, par de nombreux chercheurs, pour contrôler les bioagresseurs telluriques des bananiers et plantains, nous tenons à exposer certaines d'entre elles :

I.1.3.1.1- Lutte physique

L'utilisation des tronçons de pseudo-tronc (disposés dans les champs) et de pièges (4 pièges par hectare) à sordidine, «phéromone» (Tixier *et al.*, 2010) sont des méthodes efficaces pour lutter contre le charançon noir du bananier.

La submersion des champs (inondés sous 30 à 50 cm d'eau pendant six semaines, Mateille *et al.*, 1988) constitue également une méthode d'éradication des nématodes phytoparasites. Plusieurs hypothèses ont été émises, quant aux effets produits par la submersion, à savoir, l'inanition des nématodes (Loos, 1961, Mateille *et al.*, 1988), leur asphyxie (VanGundy *et al.*, 1962), ou la toxicité de substances libérées en conditions anaérobies (Hollis & Rodriguez-Kabana, 1966 ; Jacq & Fortuner, 1978, 1979). Notons, qu'en culture bananière, l'efficacité de cette méthode dépend de la durée de la submersion (Ducharme, 1955 ; Birchfield, 1957 ; Feldmesser *et al.*, 1960 ; Tarjan, 1961, ; Sarah *et al.*, 1963 ; Maas, 1969, Rajendran *et al.*, 1979) et aussi, de la topographie des parcelles (difficulté à mettre en œuvre avec les cultures sur les pentes de montagnes). Cependant, elle est très variable en fonction de l'espèce de

[2] **Durabilité** : Selon le dictionnaire Le Petit Robert, la durabilité est d'abord le « caractère de ce qui est durable ». C'est la permanence, la pérennité et la persistance. Dans le contexte de l'agriculture, la « durabilité » se réfère principalement à la capacité de rester productif tout en maintenant la base des ressources.

[3] **Résilience :** la résilience écologique est définie comme la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'un peuplement, d'une population, etc. à retrouver un fonctionnement normal après avoir connu des perturbations importantes du fait de un ou plusieurs facteurs (abiotiques ou biotiques) de l'environnement.

nématode, seul *R. similis* est effectivement éradiqué (Mateille *et al.*, 1988 ; Mateille *et al.*, 1992).

D'autres études mettent en évidence les jachères assainissantes (à durée variable) ou les rotations culturales contrôlées comme moyens prophylactiques pour lutter contre ces bioagresseurs (Ganry, 2004 ; Rhino *et al.*, 2010 ; Tixier *et al.*, 2010). Certaines études ont montré que ces méthodes permettent d'éradiquer *R. similis*, selon le choix des adventices ou de la plante cultivée (Loos, 1961 ; Keech *et al.*, 1975 ; Salas *et al.*, 1976 ; Zem & Alves, 1983). L'efficacité des jachères est assez relative car, celles-ci ont la capacité de modifier radicalement la structure des peuplements de nématodes dans les sols (Mateille *et al.*, 1992). Cependant, aucune de ces méthodes n'assure, réellement, la régulation permanente de ces ravageurs.

I.1.3.1.2- Lutte culturale

La lutte culturale contre le charançon noir a été largement recommandée mais les données démontrant son efficacité sont limitées (Infomusa, 2003).

Actuellement, les plantations de bananiers plantains se heurtent à l'indisponibilité du matériel végétal sain. De plus, la pression parasitaire s'exerçant sur cette culture ne fait que renforcer l'utilisation de rejets infestés, ramenant ainsi la durée des plantations maximale à deux ou trois cycles. Les rejets « baïonnettes » peuvent être nettoyés par parage puis pralinés[4] ou traités à l'eau chaude (Coyne *et al.*, 2010) ou encore à la bouillie de bordelaise. Ces traitements permettent de réduire les populations de nématodes phytoparasites (Bridge *et al.*, 1997) et de charançons dans les champs (Infomusa, 2003) sans pour autant régler le problème, ce qui décourage les paysans, surtout ceux qui sont les plus vulnérables et qui ne disposent pas assez de foncier et de moyens financiers pour réaliser soit une jachère assainissante, ou une rotation culturale raisonnée.

Par ailleurs, l'utilisation des *vitro-plants* est un autre moyen plus efficace de lutter contre les bioagresseurs telluriques. Cette méthode est très largement répandue aux Antilles françaises et concerne uniquement le bananier dessert. Rappelons que les vitro-plants du plantain sont plus sensibles aux affections virales que ce dernier (Sarah *et al.*, 1990). Pour remédier à cette contrainte, les chercheurs du CARBAP ont mis au point une technique dite

[4] **Pralinage** : consiste à tremper le matériel végétal dans une solution phytosanitaire (fongicides, insecticides, nématicides) pour le protéger des éventuels attaques.

PIF *« Plants Issus de Fragments de tiges* » permettant d'obtenir des *vivo-plants*. Ces derniers représentent un matériel végétal sain indemne de nématodes et de larves de charançons, équivalent des vitro-plants (Kwa, 2003 ; Tenkouano *et al.*, 2006).

Mentionnons en outre que, grâce à cette technique, il est possible d'obtenir à partir d'un rejet, entre 10 et 50 plants en fonction de la variété du plantain (Kwa, 2002 ; Ngo-Samnick, 2011). En fait, l'avantage de cette technique réside dans le fait que les moyens requis sont simples, peu coûteux et accessibles à tous les agriculteurs. Grâce à sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre, cette technique connait un essor indéniable, notamment auprès des paysans camerounais (Sadom *et al.*, 2010 ; Ngo-Samnick, 2011).

Ce sont donc les raisons sus-mentionnées, qui justifient notre choix dans la reproductibilité de cette technique PIF, dans le cadre de ce travail de thèse. En effet, ceci se révèle un bon moyen d'obtenir des plants sains, à faible coût.

La méthode idéale pour lutter contre les ravageurs telluriques serait de planter un matériel végétal sain, indemne de parasites (Marie *et al.*, 1993) sur un sol préalablement assaini par des jachères ou des rotations culturales contrôlées (Lassoudière, 1985 ; Ternisien, 1989 ; Ternisien & Ganry, 1990 ; Ganry, 2001). L'application de ces bonnes pratiques agricoles a diminué de près de 60 % l'emploi des nématicides-insecticides entre 1996 et 2002 dans les bananeraies dessert (Chabrier *et al.*, 2004). Il en résulte un niveau sanitaire global amélioré (Quénéhervé *et al.*, 2005). En plus de ces bonnes pratiques, une lutte biologique peut être également envisagée dans le but de renforcer la résistance de la plante face aux attaques des parasites.

I.1.3.1.3- Lutte biologique

Des études ont montré l'efficacité des feuilles et des graines de neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) contre les maladies et parasites des cultures (Javed *et al.*, 2008). Elles peuvent être utilisées sous forme de poudre ou de tourteaux mélangés avec du fumier (Musabyimana & Saxena, 1999) en vue de réduire les populations de nématodes phytoparasites. D'autres études ont montré que l'apport de matière organique au sol entraîne une diminution de nématodes phytoparasites (Singh & Sitaramaiah, 1973 ; Adekunle & Fawole, 2002 ; Tabarant *et al.*, 2011) et une augmentation de la croissance des cultures (Nath & Singh, 2011). Des chercheurs ont démontré que les vermicomposts solides peuvent supprimer les nématodes phytoparasites dans les champs (Arancon *et al.*, 2003 ; Edwards *et al.*, 2007).

L'utilisation d'agents de contrôle biologique tels que les champignons entomopathogènes (*Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae*) et les nématodes

entomopathogènes (*Steinernema carpocapsae* et *S. feltiae)* pourraient améliorer, dans un futur proche (travaux en cours ; Tixier *et al.*, 2010), les systèmes de piégeage dans la *lutte biologique intégrée* contre le *C. sordidus* (Chabrier *et al.*, 2002 ; Infomusa, 2003 ; Tixier *et al.*, 2010). Cette méthode de lutte parait être efficace, car les charançons parasités peuvent infester toute une colonie grâce à l'effet retard du parasite (durée de survie de 10 jours), (Akello *et al.*, 2008, 2009). En revanche, l'innocuité de ces parasites de *C. sordidus* vis-à-vis des organismes non ciblés n'est pas déterminée, et encore moins la maîtrise de leur multiplication (Padmanaban & Stathiamoorthy, 2001) ; enfin, les résultats escomptés au champ, ne se sont pas révélés satisfaisants ni en Australie, ni en Guadeloupe (Lassoudière, 2007).

L'utilisation de plantes de service à effet nématorégulateur constitue une alternative intéressante, relativement facile à l'emploi et non polluante. Ces espèces sont pour la plupart utilisées principalement en rotation, plus rarement en cultures associées, ou encore, comme amendement organique. Aussi, le contrôle des populations de nématodes phytoparasites peut se faire via l'utilisation : i) des œillets d'inde (*Tagetes* spp.) en rotation ou en décomposition dans le sol (Endo, 1959 ; Johnson, 1974, Mervin & Stiles, 1989 ; Koenning *et al.*, 1985 ; Minton & Parker, 1987 ; Oostendorp *et al.*, 1991) ; ii) des plantes de la famille des « Solanacées » (Miller *et al.*, 1973 ; Winslow, 1995), des Crucifères et des Crotalaires (Tixier *et al.*, 2010 ; L'Etang, 2012) ; iii) du Bahia grass « *Paspalum notatum* », comme plante associée sous les bananeraies (Djigal *et al.*, 2012). En dernière analyse, la lutte variétale (sélection des variétés resistantes à ces parasites) pourrait être une méthode de lutte envisageable vis-à-vis de ces ravageurs telluriques.

I.1.3.1.4- Lutte variétale

La Fundación Hondureña de Investigación Agricola « FHIA » a mis au point des hybrides de bananiers plantains, résistants aux attaques des nématodes phytoparasites (Pinochet & Rowe, 1979 ; Rowe & Rosales, 1993 ; Bridge *et al.*, 1997). Mais, à ce jour, ces cultivars n'ont pas encore fait l'objet d'études aux Antilles Françaises (Quénéhervé *et al.*, 2006). Il conviendrait de renforcer les recherches en réseau, pour partager les connaissances et proposer des solutions adaptées aux contextes des pays producteurs de bananiers plantains, pour parvenir à une gestion plus efficace de ces parasites.

Il importe de préciser, toutefois, que l'utilisation de ces méthodes conventionnelles ou alternatives, peut avoir un impact négatif ou positif sur le compartiment sol sur lequel elles s'appliquent. Ces pratiques sont les principales responsables de la modification de la fertilité

physico-chimique, biologique et morphologique des sols. Par conséquent, nous ne saurions passer outre sans aborder cette composante jouant un rôle fondamental dans les agroécosystèmes.

I.2. LE COMPARTIMENT SOL

I.2.1- LE SOL : RÉSERVOIR DE LA VIE SOUTERRAINE

Le sol représente l'un des quatre composants fondamentaux de l'agrosystème, à côté du climat, du peuplement végétal et des populations animales (Doré *et al.*, 2006) et des itinéraires techniques qu'on y applique. Le sol est aussi l'un des réservoirs le plus important de la biodiversité (Wolters, 2001). Sa qualité est définie comme sa capacité à assurer plusieurs fonctions telles que : support de végétation, réservoir d'eau, purificateur d'eau, transformation et neutralisation des polluants et support de biodiversité et de nutriments (Wilson & Maliszewska-Kordybach, 2000). L'évaluation de ses caractéristiques physique, chimique, biologique et morphologique est déterminante pour juger de la durabilité des systèmes de culture, principalement dans les régions tropicales où la fragilité des sols aggravée par la déforestation a conduit à une diminution de la fertilité (Ortiz *et al.*, 1994 ; Geissen & Morales, 2006).

En effet, le sol est un système particulier caractérisé par des interactions intimes et multiples entre les composantes : minérale et organique, les organismes vivants, l'atmosphère et l'hydrosphère. La structure des communautés du sol reflète *in fine* l'action de différents facteurs agissant à des échelles spatio-temporelles qui leurs sont propres (King *et al.*, 2008). Ainsi, les processus écologiques se déroulant au sein des sols cultivés constituent les principaux leviers pour concevoir une agriculture performante et respectueuse de l'environnement (Rosset & Altieri, 1997).

Selon de récentes estimations, la faune du sol représenterait jusqu'à 23% de la diversité totale des organismes vivants terrestres de la planète qui ont été décrits à ce jour (Lavelle *et al.*, 2006). L'abondance et la biodiversité de la faune du sol pourraient aider à lutter contre le développement des bioagresseurs dans les agroécosystèmes, via un système de régulation naturelle (Wardle *et al.*, 1999 ; Brévault *et al.*, 2007). Selon toute vraisemblance, l'application excessive de pesticides serait à l'origine de déséquilibres biologiques et de la prolifération des populations de parasites et de ravageurs telluriques (Chaboussou, 1969 ; Ferron, 1999 ; Clermont-Dauphin *et al.*, 2004).

Les vers de terre, les termites et les fourmis sont comptés parmi les composantes biologiques les plus importantes des sols. Ainsi, l'importance de leurs activités leur a valu le titre d'« *ingénieurs de l'écosystème* » (Stork & Eggleton, 1992 ; Jones *et al.*, 1997 ; Brussaard, 1998). Ces ingénieurs construisent des structures organo-minérales stables qui peuvent profondément affecter l'environnement vis-à-vis d'organismes plus petits et,

empêcher par exemple, le mouvement de nématodes vers les racines du bananier (Lafont *et al.*, 2007 ; Loranger-Merciris *et al.*, 2012). De même, par leurs activités, ils contrôlent de façon directe ou indirecte, la disponibilité des ressources pour les autres organismes en modifiant l'environnement biotique ou abiotique (Lavelle *et al.*, 2004).

I.2.2- LA MATIÈRE ORGANIQUE

La matière organique des sols est aussi une composante particulièrement importante et un indicateur de la durabilité de la fertilité des sols et de leur résistance à la dégradation ou à l'érosion. Elle peut être apportée sous différentes formes : résidus de culture, élagage, mulch, composts, boues d'épuration, fumier, etc. Ainsi, l'apport de la matière organique aux sols augmente leur stabilité structurale ainsi que l'accessibilité des nutriments aux plantes via une augmentation des populations microbiennes (Edwards, 1988 ; Galli & Tomati, 1995 ; Doube, 1997). Il y a lieu de noter que, contrairement aux engrais chimiques qui apportent des ressources minérales aux terres agricoles, la matière organique apporte aussi de l'énergie pour le fonctionnement des organismes du sol.

Tabarant *et al.* (2011) ont montré que l'apport de composts aux bananiers, en champ contrôlé, peut entrainer une augmentation de la croissance des plants et une diminution des nécroses racinaires dues aux attaques de nématodes phytoparasites. La matière organique joue également un rôle dans la restauration des réseaux trophiques des sols, car la grande majorité des organismes édaphiques sont saprophages (Lavelle & Spain 2001). L'augmentation de l'abondance et la diversité des saprophages permettrait la diversification des prédateurs et donc une meilleure régulation naturelle. Pour ces raisons, il est important de maintenir un stock de carbone organique suffisant dans les sols, l'une des conditions indispensables pour une production agricole durable.

Selon une récente étude faite par Sierra *et al.* (2013) sur le compostage et le vermicompostage, le vermicompost peut apporter au sol des formes de matière organique dite « stable ». Selon les auteurs, l'utilisation d'un tel amendement organique dans les cultures serait une option intéressante pour la restauration et l'amélioration des agents biologiques et de la fertilité des sols tropicaux. À ce jour, il existe très peu d'études portant sur l'intérêt du vermicompost dans le contrôle des populations de nématodes phytoparasites des bananiers plantains.

En dernière analyse, il apparait que le *vermicompost* peut fortement contribuer à la régulation de ces bioagresseurs, à l'augmentation de la croissance des végétaux et au

rétablissement des réseaux trophiques (Tabarrant *et al.*, 2011). Lorsque les apports de matière organique sont importants, ceci contribuerait à la diminution de la pression du complexe parasitaire tellurique et au renforcement de la vigueur du bananier entrainant une plus forte productivité de la culture.

Dans une telle hypothèse, plusieurs objectifs du *vermicompost* sont à rechercher : i) l'augmentation de la richesse en éléments nutritifs via la minéralisation de la matière organique du vermicompost par l'activité microbienne ; ii) la préservation et/ou la restauration de la qualité organique des sols dégradés ; iii) le maintien de l'équilibre biologique édaphique et le renforcement des réseaux trophiques dans les sols des bananeraies plantains, et iv) la maitrise des populations de nématodes phytoparasites de ces bananeraies.

Par ailleurs, les fonctions agrosystémiques du vermicompost pourraient être renforcées par l'introduction d'une plante de service assurant un couvert total du sol sous les bananeraies plantains. En conséquence, le chapitre suivant sera consacré à la description du *Paspalum notatum cv.* Pensacola (Poaceae), plante de couverture ou de service déjà testée sous des bananeraies pérennes (type dessert) aux Antilles françaises, pour ses multiples fonctions écosystémiques.

.

I.3. LES PLANTES DE SERVICE : RENFORCEMENT DE LA BIODIVERSITÉ VIA LES ASSOCIATIONS DE CULTURES

Les processus écologiques se déroulant au sein du champ cultivé sont les principaux leviers pour concevoir une agriculture performante et respectueuse de l'environnement (Rosset & Altieri, 1997). Les plantes de service sont des espèces végétales destinées, parmi d'autres services, à fournir en association (moyennant une compétition maîtrisée) ou en rotation, des services de capture-fourniture d'azote et/ou de contrôle parasitaire (notamment nématorégulatrice). Parmi les processus mobilisés pour concevoir une agriculture durable, les interactions entre communautés permettant de contrôler les bioagresseurs et de renforcer les différentes composantes de la fertilité des sols, sont centrales (Dorel *et al.*, 2011).

Par exemple, la création de porosité et de structure du sol stable et favorable à l'installation des racines du bananier peuvent être obtenues par une plante de service sans travail du sol, grâce à l'action directe de ses racines sur le sol ou indirectement en fournissant des ressources et des habitats pour les ingénieurs du sol (vers de terre, termites, fourmis) qu'elle constitue (Dorel *et al.*, 2011). Aussi, l'intégration dans les systèmes de culture plantain de plantes capables de fournir certains services écosystémiques est un moyen pour limiter le recours aux intrants chimiques tout en maintenant la productivité de la bananeraie (Moonen & Bàrberi, 2008). La principale contrainte à maîtriser ici, en utilisant une plante de service, est la compétition pour l'eau, les nutriments et la lumière entre la plante de service introduite et la culture principale, le plantain. En fait, pour qu'une plante de service soit utilisée sous bananeraies, il faudrait qu'elle réponde à différents critères tels que : biomasse élevée, reproduction facile, cycle annuel et pérenne (par rapport au cycle du bananier), faible compétitivité pour l'eau et les nutriments, non hôte de nématodes et non envahissante, pas très haute, pas de croissance plus rapide que celle du bananier.

À ce propos, plusieurs études montrent que l'usage des plantes de service entraîne une couverture de litière permanente limitant la perte de diversité et d'abondance de la macrofaune du sol (Barros *et al.*, 2002). Cette couverture ou cette litière se révèle indispensable dans l'établissement d'une faune diversifiée dans les sols (Barros *et al.*, 2002). S'il s'agit d'une légumineuse, il peut y avoir un transfert directe d'azote de la plante de service au sol et à la plante (Sierra & Nygren, 2006) qui s'ajoute au renforcement de la diversité de la faune du sol (Blanchart *et al.*, 2006 ; Du Pont *et al.*, 2009). En conséquence, l'association d'une légumineuse à une culture de rente (comme le plantain), menée à bas niveau d'intrants, peut être une source d'azote importante pour le rendement de celle-ci (Daudin & Sierra, 2008).

Parmi les plantes de service qui sont déjà testées en bananeraies, l'espèce *Paspalum notatum cv.* Pensacola, communément appelé « Bahia grass » se révèle particulièrement intéressante pour ses multiples fonctions écosystémiques (Tixier *et al.*, 2011 ; Fidalski, 2007 ; Djigal *et al.*, 2012). C'est donc une herbacée pérenne tolérante à l'ombrage. Elle est caractérisée non seulement, par sa vitesse de croissance et sa biomasse moyennes mais aussi, par son statut non hôte de *R. similis* et sa permanence sous bananeraie. Les principaux constats relatifs aux traits exploitables recherchés chez cette espèce sont : i) l'amélioration des conditions physiques du sol ; ii) le caractère non-hôte ne permettant pas aux nématodes phytoparasites du bananier de se multiplier ; iii) sa capacité à contrôler les mauvaises herbes dans les parcelles, ce qui supprime l'usage des herbicides qui contaminent les sols et perturbent l'abondance et la diversité de la faune du sol ; iv) sa tolérance à l'ombrage ainsi que sa permanence sous bananeraies.

I.4. CADRAGE DE LA RECHERCHE

I.4.1- QUESTION DE RECHERCHE

Dans le cadre de la problématique actuelle de réduction de l'utilisation d'intrants chimiques et de la mise au point d'alternatives agro-écologiques dans les systèmes de culture plantains dans la Caraïbe, l'amélioration de ces systèmes doit prendre en compte aussi bien leur grande diversité (sol, climat, pratiques, …) que la grande instabilité de leur contexte (marché, réglementation, …). Bien que le plantain soit *a priori* soumis aux mêmes ennemis naturels que le bananier dessert d'exportation, l'analyse préliminaire des travaux montre qu'il existe peu de références disponibles sur la lutte contre les bioagresseurs dans les plantations de plantains aux Antilles, notamment en Guadeloupe et en Haïti. Face à ce constat, une enquête exploratoire agri-environnementale se révèle indispensable pour pouvoir faire un état des lieux. *In fine*, ces enquêtes devront nous permettre tout d'abord, d'identifier les différents systèmes de culture plantains existant tant en Guadeloupe qu'en Haïti, et ensuite, de construire un outil de diagnostic agro-écologique qui nous permettra d'analyser les principales contraintes auxquelles sont exposées ces systèmes de culture plantains dans ces deux régions.

À l'issu de ce diagnostic, une expérimentation sera mise en place en champ, en station de recherche, afin de tester une combinaison de plusieurs innovations agro-écologiques. Cette expérimentation devra nous permettre de tester des solutions susceptibles d'être adoptées par les agriculteurs de la filière bananier plantain dans la Caraïbe. Compte tenu des raisons logistiques et financières, il important de signaler que cette expérimentation sur le test de pratiques innovantes sera menée uniquement en Guadeloupe. Ce qui nous amène à définir notre question de recherche qui est double :

i) Comment concevoir et mettre en œuvre une démarche de diagnostic agro-écologique permettant d'analyser les composantes de la durabilité de plantations de bananiers plantains au regard de l'influence des choix d'assolements et techniques sur les fonctionnalités écologiques mise en œuvre dans la biorégulation de pathogènes telluriques ?

ii) Quel effet de pratiques innovantes sur l'amélioration de l'état phytosanitaire de bananeraies plantains et le renforcement de leur durabilité ainsi que le maintien des équilibres biologiques édaphiques ?

I.4.2- HYPOTHESES DE TRAVAIL, OBJECTIFS ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Il existe une variabilité de modes de conduites entre les agriculteurs d'une même région voire de ceux d'une autre région. L'hypothèse selon laquelle une plantation menée de manière agro-écologique (assainissement des parcelles et diminution des intrants chimiques) est moins soumise à l'attaque des bioagresseurs telluriques est celle que nous testerons dans notre étude.

Les hypothèses sous-jacentes étant : i) le renforcement du pool organique et de l'activité biologique dans le sol permettraient de manière systémique, des niveaux de régulations naturelles significatives des ravageurs telluriques et une amélioration de la vigueur du bananier ; ii) que les pratiques culturales intensives peuvent être à l'origine d'un mauvais état phytosanitaire de la parcelle qui se traduit par le développement anormal des bioagresseurs telluriques (nématodes et charançons) à l'origine d'une diminution de la productivité du plantain, en lien avec une dégradation de la fertilité physique, chimique, biologique et la structure morphologique du sol. Au contraire, les conduites culturales non intensives, diversifiées peuvent justifier d'un bon état phytosanitaire de la parcelle, hypothèse que nous testerons à partir d'une expérimentation au champ en station de recherche ;

Plusieurs originalités se dégagent dans ce travail de thèse :

a) la conception et la mise en place d'un outil de diagnostic agro-écologique, dans les systèmes de culture plantains, en vue d'identifier les processus écologiques qui concourent à réguler les bioagresseurs telluriques en rétablissant les équilibres biologiques du sol. Car, il n'existait, à ce jour, aucun diagnostic de cette nature réalisé sur ces systèmes de culture dans les deux régions qui concernent notre étude ;

b) dans ce travail de thèse, nous testerons trois innovations agro-écologiques parmi les plus prometteuses en termes de réduction de pesticides utilisés dans la lutte conventionnelle contre les nématodes phytoparasites et le charançon noir du bananier plantain. Ce travail nous permettra de contribuer à la conception des systèmes de culture plantains à faibles intrants chimiques et durables dans la Caraïbe. À proprement parler, ce cadre expérimental constitue l'un des points forts de cette thèse, étant donné qu'il repose sur un réseau de parcelles conduites en conditions paysannes.

Du point de vue de la dynamique d'innovation en cours aux Antilles, les objectifs assignés à notre étude seront de :

i) développer une méthodologie de diagnostic *ad hoc* pour évaluer l'impact des pratiques et l'occurrence des maladies via des indicateurs sur la qualité du sol, et la santé des systèmes de culture plantains ainsi que leurs performances ;

ii) identifier et mettre en évidence les paramètres agro-écologiques qui concourent à la gestion de la fertilité du sol et permettant de contrôler un ou plusieurs parasite(s) affectant les bananeraies plantains en Guadeloupe et en Haïti, tout en assurant une meilleure performance environnementale et la durabilité de ces bananeraies ;

iii) Caractériser la diversité des pratiques agricoles actuelles dans les systèmes de culture plantains afin d'évaluer leur impact sur l'environnement, l'état sanitaire et la performance du plantain ;

iv) mettre en place une expérimentation semi-contrôlée en plein champ avec des traitements différents en vue d'expliquer les relations existant entre les paramètres écologiques, l'état phytosanitaire et la performance du plantain à la parcelle ;

v) expliquer les processus à l'œuvre au sein de ces systèmes de culture, dans un contexte agro-écologique afin de contribuer à la conception des systèmes de cultures plantains innovants, plus productifs, exempts d'intrants chimiques et durables ;

vi) concevoir et tester des options d'amélioration de production du plantain dans la Caraïbe notamment en Haïti.

I.5- DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE

I.5.1- DIAGNOSTIC AGRONOMIQUE VERSUS DIAGNOSTIC AGRO-ECOLOGIQUE

Le *diagnostic agronomique* constitue l'un des principaux outils d'évaluation des effets des pratiques culturales. Il permet, à partir de l'analyse d'un ensemble d'indicateurs dont les composantes du rendement, d'identifier *a posteriori* les facteurs du milieu et du système de culture qui ont été à l'origine des différences de production entre parcelles d'une même région (Meynard & David, 1992). Il consiste à établir le lien entre les performances agronomiques (niveau et qualité des productions, maintien de la fertilité des sols à long terme), le milieu biophysique et les itinéraires techniques mises en œuvre par l'agriculteur.

L'objectif d'un tel diagnostic est de proposer des pratiques de gestion économiquement viables pour accroître le rendement et la production (Jackson, 2010). Par exemple, à l'issue d'un diagnostic agronomique régional en zone d'altitude d'Haïti, Clermont-Dauphin *et al.* (2003, 2005) ont mis en évidence un groupe de parcelles où les faibles efficiences de la fertilisation chimique du haricot étaient associées à un fort niveau d'infestation parasitaire du système racinaire de la culture. Ils montraient en outre que, ces niveaux d'infestation élevés étaient associés aux situations où la culture de haricot revenait tous les ans sur les parcelles. Sur la base de ce diagnostic, différentes option de gestion technique de ces parcelles ont été formulées : Sélection de variétés résistantes au *Fusarium solani* en préalable à toute décision de fertilisation chimique, traitement chimique des semences, choix des dates de semis, allongement de la rotation et diversification avec des espèces non hôtes (maïs, graminées) afin de réduire la pression d'inoculum, ect.

Le *diagnostic agro-écologique* s'intéresse non seulement, aux effets des systèmes de culture sur l'élaboration de la production, mais aussi accorde une place privilégiée à leurs effets sur le fonctionnement et les services écologiques des sols et des agrosystèmes. Les connaissances et outils de l'écologie sont un bon atout pour résoudre certains problèmes complexes en agriculture (Jackson, 2010).

La conservation de la biodiversité est devenue un enjeu majeur de la durabilité en agriculture, renforcée par l'introduction du concept de services écosystémiques par le Millenium Ecosystem Assessment (2005). Ce travail a stimulé les travaux de recherche sur les services écologiques, produisant à la fois des développements méthodologiques, des études de cas sur des systèmes ou services particuliers (la production primaire ou la pollinisation, par exemple), des recherches sur les mécanismes impliqués dans les relations entre biodiversité et services écologiques, ou sur les évaluations socio-économiques de ces services. Dans un

contexte d'agriculture écologiquement intensive, la biodiversité est en effet à la base de nombreux services écosystémiques comme le contrôle biologique des bioagresseurs, la pollinisation ou le maintien de la fertilité des sols (Le Roux *et al.*, 2008) La prise en compte des services écosystémiques en agriculture requiert des outils d'évaluation opérationnels et notamment des indicateurs pour l'aide à la décision (Carpenter *et al.*, 2006).

D'autres études enfin manipulent la diversité de groupes d'organismes du sol (richesse spécifique de la macrofaune ou de la mésofaune, complexité des réseaux trophiques dans le sol, diversité microbienne, ...) pour évaluer son rôle dans la fertilité du sol ou des fonctions qui sous-tendent ce service ; ces expériences sont souvent réalisées au laboratoire, dans des "microcosmes" de sol avec ou sans végétation provenant de prairie ou de culture (Le Roux et *al.*, 2008). Le modèle valorisé par l'agroécologie vise à la conception d'agroécosystèmes durables qui imitent et conservent le plus possible les processus écologiques d'un écosystème naturel (Altieri & Nicholls, 2005).

Tenant compte des conclusions précédentes, dans une démarche de *diagnostic agro-écologique*, on devrait s'intéresser, en plus des critères de rendement et des pratiques culturales, aux multiples services écosystémiques, à la description des individus, des peuplements, des communautés de l'agro-écosystème ainsi que leurs interactions avec l'environnement. Quel serait donc le diagnostic agro-écologique à développer dans les systèmes de culture plantains ?

I.5.2- DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE DES SYSTÈMES DE CULTURE A BASE DE PLANTAINS

I.5.2.1- Objectifs du diagnostic agro-écologique

Généralement, les objectifs assignés à un diagnostic agro-écologique sont doubles : en tout premier lieu, il consiste à comprendre comment les composantes environnementales et techniques affectent les performances des parcelles. En effet, l'agroécologie s'interesse aux fonctions écologiques des agro-écosystèmes, autrement dit, aux processus biotiques qui sont susceptibles d'avoir une influence sur les services. L'objectif finalisé de l'agroécologie consiste à activer ces processus pour en augmenter les services. Ces services ont été classés en trois groupes par les agronomes (Le Roux *et al.*, 2008) : i) les services intrants (qui gèrent l'accès aux ressources des cultures, dont le contrôle des bioagresseurs), ii) les services produits contribuant au revenu agricole direct, et iii) les services produits hors revenu agricole direct (par exemple purification de l'eau, mitigation des incendies…). En second lieu, un tel

diagnostic permet d'identifier les principes écologiques qui sous-tendent des possibilités de régulation biologique naturelle des bioagresseurs (Brévault *et al.*, 2007). Ces auteurs ont démontré que, dans les systèmes de culture de coton, le mode de gestion des sols (absence de labour et couverture permanente du sol par des plantes : graminées, légumineuses) peut entrainer l'activation de la macrofaune du sol et donc l'amélioration de la production de la plante. En ce qui concerne les principales fonctions écologiques, les herbivores et les prédateurs étaient beaucoup plus abondants dans les parcelles menées sans labour avec un couvert végétal de type graminée (*Brachiaria ruziziensis* Germain and Eward) que dans les parcelles travaillées au labour conventionnel et sans paillis ; tandis que, les détritivores, les prédateurs et les herbivores étaient beaucoup plus abondants dans les parcelles menées sans labour avec un couvert végétal de type légumineuse (*Crotalaria retusa* L. ou *Mucuna pruriens* Bak.) que dans les parcelles travaillées de manière conventionnelle. Les systèmes de culture à base de paillis et semis directs favorisent la création des communautés diverses de la macrofaune du sol.

I.5.2.2- Outils du diagnostic agro-écologique

Altieri & Nicholls (2002) ont développé une méthode agro-écologique rapide permettant d'évaluer la qualité du sol et la santé des plantations de café à l'aide de dix indicateurs (structure, compaction, infiltration, profondeur du sol, état des résidus végétaux, couleur et odeur de la matière organique, rétention d'humidité, développement des racines, couverture du sol, érosion, activité biologique). Afin d'évaluer ces indicateurs, ces auteurs ont donné une note allant de 1 (mauvaise qualité) à 10 (très bonne qualité). Les valeurs de ces indicateurs donneront l'état agro-écologique de la plantation. L'avantage de cet outil, c'est qu'il est facile à mettre en œuvre par l'agriculteur. Toutefois, il ne peut convenir dans le cas des bananeraies plantains pour lesquelles des analyses plus poussées sont nécessaires afin d'évaluer la durabilité et la productivité de la plantation. Vu qu'il ne prend pas en compte les performances de production et, n'a pas été validé dans le cas des plantations de plantains dans les régions d'étude. Une telle validation nécessiterait le développement d'une démarche de diagnostic agroécologique afin d'établir les relations entre ces indicateurs et la variabilité régionale des niveaux de performances (production, état sanitaire des cultures, maintien de la fertilité des sols à long terme, ect.) mesurés.

Par ailleurs, d'autres outils ont été élaborés par d'autres auteurs pour mesurer l'impact environnemental de l'activité agricole, il s'agit de : IDEA « Indicateurs de Durabilité des

Exploitations Agricoles » (Vilain *et al.*, 2003), DIAGE « Diagnostic Global d'Exploitation » (FRCA Centre, 2002), DIALECTE « Diagnostic Liant Environnement » et CTE « Contrat Territorial d'Exploitation » (Solagro, 2002). Ces quatre outils permettent d'obtenir une note globale de performance environnementale pour une exploitation agricole mais, pas pour une parcelle donnée. Les outils comme DIALOGUE « Diagnostic agri-environnemental global d'exportation agricole » (Solagro, 2002), INDIGO « Indicateurs de diagnostic global à la parcelle » (Bockstaller & Girardin, 2003) et GISQ « General Indicator of Soil Quality » (Velasquez *et al.*, 2007) permettent d'évaluer uniquement la qualité du sol à l'échelle des parcelles.

L'indicateur « GISQ » nous paraît l'outil le plus adapté pour collecter des données à l'échelle parcellaire. En effet, cet indicateur comporte cinq sous-indicateurs (physique, chimique, biologique, biodiversité et morphologie du sol) permettant d'apprécier la qualité du sol sous toutes ses formes et tous ces aspects. Cependant, bien que le GISQ soit efficace pour évaluer la qualité du sol, il ne peut à lui seul, répondre à toutes les attentes de notre étude sur les systèmes de culture à base de plantains.

Dans ce cas, pour réaliser un diagnostic agro-écologique dans les systèmes de culture plantains, il est important de concevoir un outil qui prendra également en compte non seulement, la qualité du sol mais aussi, l'état phytosanitaire des plants (organes aériens et souterrains) ainsi que la productivité à la parcelle.

I.5.2.2.1- Qualité du sol

Comme nous l'avons exposé antérieurement (*cf.* 1.2.1- § 4), les « ingénieurs de l'écosystème », ou « ingénieurs écologiques » (lombrics ou vers de terre, termites et fourmis ; Jones *et al.*, 1994 ; Decaëns *et al.*, 2001) jouent un rôle crucial dans le maintien de la fertilité du sol. En effet, ils affectent les propriétés physiques (porosité, infiltration, rétention d'eau), chimiques (minéralisation de la matière organique et mise en disposition de nutriments) et biologiques des sols (accumulation de structures biogéniques tels que les turricules, fèces, galeries, chambres,…), (de Ruiter *et al.*, 1998 ; Lavelle *et al.*, 1998 ; Kladivko, 2001 ; Ettena & Wardle 2002 ; Swift *et al.*, 2004 ; Barrios, 2007 ; Lafont *et al.*, 2007 ; Loranger-Merciris *et al.*, 2012).

À ce jour, il existe très peu d'informations disponibles sur les interactions entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols où poussent les bananiers (Pattison *et al.*, 2008). Par conséquent, dans le cadre de notre étude, la qualité du sol sera évaluée à travers

les cinq sous indicateurs du GISQ (Velasquez *et al.*, 2007) : propriétés chimiques et physiques des sols, morphologie, matière organique et biodiversité.

a) Propriétés chimiques et physiques des sols

Les propriétés chimiques correspondent à la capacité du sol à stocker et fournir des éléments minéraux nécessaires pour la croissance de la plante (Velasquez *et al.*, 2007). L'optimisation du rendement du bananier plantain est liée aux principaux éléments nutritifs indispensables à la croissance et à la fructification de la plante.

Les propriétés physiques du sol telles que la porosité, la conductivité hydraulique, la texture et la résistance mécanique ou encore l'aération, sont également importants à déterminer dans un diagnostic agro-écologique des systèmes de culture plantains, car elles assurent le bon développement du système racinaire des bananiers (Dorel & Perrier 1990 ; Subbian *et al.*, 2000 ; Dorel, 2005). Le système racinaire du bananier semble particulièrement sensible aux propriétés physiques du sol. La culture du bananier plantain nécessite un sol bien aéré qui se révèle indispensable pour un meilleur ancrage des racines (Lassoudière 1978a ; Gousseland, 1983). Godefroy (1969) fait remarquer qu'un développement racinaire en profondeur peut permettre un potentiel élevé de certains sols, et ce malgré de faibles teneurs en éléments chimiques. Les racines du bananier n'atteignent que rarement des profondeurs de 60-80cm et sont habituellement confinées dans des 30-35 premiers centimètres, voir moins dans les sols compactés (Delvaux, 1995). Les résultats de Delvaux et Guyot (1989), en bananeraie intensive, montrent une relation inverse entre la densité racinaire des horizons superficiels et leur densité apparente.

b) État structural du sol

La morphologie du sol (pourcentage d'agrégats d'origine diverses) affecte directement les propriétés : hydraulique (infiltration et stockage de l'eau), physique et biologique (structuration du sol, qualité des agrégats du sol ; Velasquez *et al.*, 2007). La présence d'une grande proportion d'agrégats biogéniques liée à une forte activité biologique (lombricienne notamment, Decaëns *et al.*, 2001 ; Jouquet *et al.*, 2006) indique probablement une qualité élevée des sols (Blanchart *et al.*, 1999 ; Ponge, 1999 ; Topoliantz *et al.*, 2000). Les structures biogéniques créées par les invertébrés sont des macro-agrégats stables jouant un rôle dans la détermination des propriétés hydrauliques du sol et la résistance à l'érosion (Blanchart *et al.*, 1999 ; Chauvel *et al.*, 1999 Jouquet *et al.*, 2006). C'est pourquoi, leur description peut être

utilisée pour établir une classification fonctionnelle des ingénieurs écologiques (Decaëns *et al.*, 2001).

c) *Matière organique*

Comme nous l'avons décrit plus haut (*cf.* I.2.2), rappelons brièvement que la matière organique des sols joue un rôle primordial dans l'amélioration de leur qualité formation d'agrégats stables, fertilité chimique, activation de réseaux trophiques. C'est pourquoi, il est aussi important de caractériser la matière organique (via des analyses chimiques) du sol dans les parcelles de plantains de notre étude afin d'identifier les différences existant entre les systèmes de culture. En effet, l'apport de la matière organique dans les sols de bananeraies entraine : i) l'amélioration de la structure du sol en profondeur (Blomme et al., 2003) et donc du drainage (McIntyre et al., 2000) ; ii) la conservation d'humidité (Bananuka et al., 2000), iii) la modération des températures (McIntyre et al., 2000 ; Talwana et al., 2003). La matière organique possède une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, et sa décomposition libère des nutriments dans la solution du sol.

d) *Biodiversité : Macrofaune du sol*

La biodiversité est définie comme « l'ensemble de toutes les formes de vie présentes à la surface de la planète, des millions de plantes, animaux et micro-organismes, aux gènes qu'ils contiennent et aux écosystèmes complexes auxquels ils appartiennent » (WWF, 1989). Dans un écosystème naturel, les maladies des plantes sont généralement contrôlées par l'effet des interactions trophiques biologiques naturelles (compétition, prédation, et parasitisme) et des interactions non-trophiques résultant des activités des ingénieurs de l'écosystème (Lavelle & Spain, 2001). De telle sorte qu'un équilibre biologique (entre prédateurs, proies et parasites) soit maintenu au sein de ces écosystèmes.

Il importe de souligner qu'il existe trois catégories d'organismes animaux vivant dans le sol en fonction de leur taille : la microfaune (<200µm), la mésofaune (0.2-2mm) et la macrofaune (> 2mm), (Bachelier, 1978 ; Lavelle *et al.*, 1997 ; Lavelle & Spain, 2001). Une plus forte diversité permet un meilleur contrôle biologique des ravageurs par complémentarité entre groupes (Schmidt *et al.*, 2003). Plus la biodiversité est élevée, plus l'intensité du contrôle biologique est élevée, et meilleure est la résilience de ce service après une perturbation.

En revanche les conclusions issues des études expérimentales concernant le contrôle biologique des ravageurs des cultures peuvent être jugées comme robustes ; des niveaux de diversité spécifique et fonctionnelle plus élevés seraient toutefois nécessaires pour être représentatifs de la diversité observée dans les agroécosystèmes (Le Roux *et al.*, 2008). Il est

désormais nécessaire de passer à des études expérimentales réalisées dans des conditions plus proches des conditions agricoles, pour quantifier et hiérarchiser les rôles respectifs de la biodiversité et des modes de gestion sur le fonctionnement des agro-écosystèmes, et tester quelles sont les conclusions tirées des expérimentations passées qui resteront applicables à des situations agricoles. Seul ce type d'études permettra de mieux évaluer les bénéfices de la biodiversité et l'intérêt de sa préservation (ou sa restauration) selon les services, les systèmes de production et les modes de gestion.

Les organismes du sol remplissent des fonctions écologiques diverses. Ils sont notamment responsables de la décomposition, de la transformation et du transport de la matière organique, de la réalisation des cycles biogéochimiques et de la formation ainsi que du maintien de la structure des sols (King *et al.*, 2008). Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons à la caractérisation de la macrofaune édaphique (fig. 2). Celle-ci peut être classée en 3 groupes fonctionnels **(**Turbé *et al.*, 2010**)** : i) le *groupe des prédateurs* qui régule les populations de proies (essentiellement saprophages, Brévault *et al.*, 2007) ; ii) le *groupe des transformateurs* de litière qui joue un rôle dans la fragmentation des débris organiques en permettant une meilleure disponibilité de certains éléments nutritifs pour la plante (Lavelle *et al.*, 1998) et ; iii) le *groupe des ingénieurs de l'écosystème* qui modifie non seulement, la structure et la dynamique de l'environnement physique par leurs activités (Lavelle *et al.*, 2004) mais aussi, la disponibilité des ressources pour les autres organismes (Jones *et al.*, 1994 ; Lavelle *et al.*, 1997 ; Lavelle & Spain 2001).

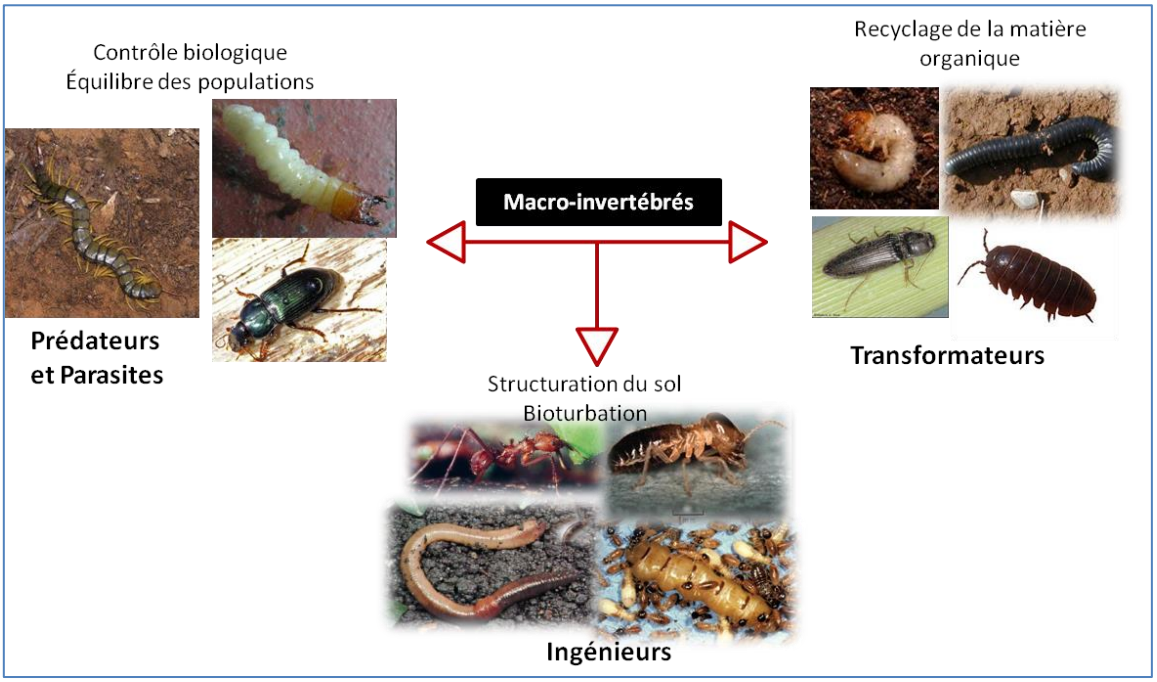


Figure 2 : Rôle des macro-invertébrés du sol dans l'écosystème terrestre

Plusieurs études ont montré que les vers de terre, de par leurs activités d'ingénierie, peuvent modifier la structure du sol, augmenter les éléments nutritifs via la minéralisation de la matière organique et affecter de manière négative l'abondance de nématodes phytoparasites et aussi, la teneur en matière organique du sol (Boyer, 1998 ; Senapati *et al.*, 1999 ; Clermont-Dauphin *et al.*, 2004). Blouin *et al.* (2005) ont montré qu'en présence du ver de terre *Pontoscolex corethrurus* les plants de riz était moins attaqués par le nématode *Heterodera sacharii*. Un effet similaire a été observé sur la banane dessert et les nématodes phytoparasites inféodés par Lafont *et al.* (2007) et Loranger-Merciris *et al.* (2012). Ces derniers ont conclu qu'en présence *P. corethrurus* les nécroses racinaires causées par *Radopholus similis* étaient moindre, et la croissance de la plante meilleure.

Hormis ces cinq sous-indicateurs de la *qualité du sol*, il nous a paru nécessaire de caractériser la présence des champignons mycorhiziens dans les parcelles de plantains diagnostiquées. En fait, ces champignons peuvent jouer un rôle non négligeable dans la qualité des sols des agro-écosystèmes tropicaux.

e) Champignons mycorhiziens : rôle écologique

Les champignons mycorhiziens à vésicule et arbuscules sont des micro-organismes qui forment à l'état naturel une association symbiotique avec les racines de nombreux végétaux (Mosse, 1956). Cette symbiose se traduit par l'apparition d'organes mixtes mycélium-racine appelés *mycorhizes* (Duponnois *et al., 2010)* dont le rôle majeur est de prélever et de transporter vers la plante des éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le Phosphore (Rhodes & Gerdemann, 1975 ; Bolan, 1991 ; Gianinazzi & Schüepp, 1994 ; Duponnois *et al.*, 2005a ; Lambers *et al.*, 2008) pour gagner un peu de carbone de la plante.

De nombreuses études ont démontré que les associations mycorhiziennes pouvaient jouer un rôle significatif dans :

i) la décomposition et la minéralisation des matières organiques végétales et la mobilisation des nutriments au bénéfice de la plante hôte (Tarafdar & Rao, 1997 ; Hodge *et al.*, 2001 ; Gobat *et al.*, 2003 ; Lambers *et al.*, 2008) qui se traduisent par des gains de biomasse souvent importants (Fogain *et al.*, 2001), ainsi que le transfert plante-plante de l'azote de la fixation symbiotique (Jalonen *et al.*, 2009) ;

ii) l'amélioration de la nutrition hydrique des plantes via les hyphes mycorhiziens (Augé, 2001) ;

iii) la pression sélective exercée sur les microorganismes saprophytes du sol tant au niveau de leur diversité génétique que de leur diversité fonctionnelle (Klett *et al.*,

2005) afin de constituer un complexe trophique associant le symbiote, la microflore mycorhizosphérique et la plante (Duponnois *et al.*, 2010) ;

iv) la protection de la plante en agissant directement sur les facteurs d'agression (pathogènes et herbivores surtout) ou en stimulant les défenses végétales (Selosse *et al.*, 2004 ; Selosse & Gibert, 2011).

Ces symbioses protectrices déterminent le succès écologique des plantes ; elles modifient les communautés végétales et les réseaux trophiques (Selosse *et al.*, 2004). Il a été démontré récemment que les exsudats des racines des bananiers mycorhizés conféraient une résistance à la plante face aux attaques de *Radopholus similis* (Vos *et al.*, 2012).

Mentionnons en outre que les champignons produisent des vésicules de stockage dans les racines et des spores asexuées sont différenciées dans le sol et parfois dans les racines ; elles servent d'organes de propagation et de survie (Duponnois *et al.*, 2010). Il est intéressant de noter à ce propos que la présence des spores de mycorhizes dans un sol donné est un indicateur de la fertilité potentielle ainsi que de la santé de ce sol. Voyons à présent un autre indicateur de notre outil, « la productivité », qui est déterminante au regard de l'analyse de la durabilité des systèmes de culture à base de plantains.

f) État phytosanitaire de la parcelle

L'état phytosanitaire d'une parcelle est généralement un bon indicateur de l'évaluation des dégâts causés par les bioagreseurs tant au niveau aérien (cercosporioses, virus de la mosaïque, etc.) qu'au niveau tellurique (flétrissement bactérien, charançons et nématodes phytoparasites). L'observation : i) des nécroses tant au niveau des feuilles qu'au niveau des racines ; ii) des galeries au niveau du bulbe, est un indicateur simple et robuste de l'état phytosanitaire des plants de banane. A titre d'exemple, Le niveau d'infestation d'une parcelle par les charançons peut être évalué par un décorticage sur des plants récemment récoltés (au moins 50 plants/ha) pour obtenir un diagnostic fiable.

Il a été démontré que, le pourcentage de racines mortes ainsi que le niveau de nécroses racinaires sont de bons indicateurs des dommages causés par les nématodes au système racinaire et de la perte de production résultante (Speijer *et al.*, 1998; Speijer & Ssango, 1999; Spiejer & De Waele, 2001). Les dommages causés par les nématodes ont un rôle dans l'établissement et le développement de maladies causées par des pathogènes du sol (Back *et al.*, 2002). Selon Hugon & Picard (1988), les nécroses racinaires auraient résulté de deux phénomènes liés entre eux mais aux dynamiques différentes : i) la pénétration et le développement des nématodes ; ii) les attaques fongiques secondaires nécrosant et détruisant

finalement la racine. Une infestation des parties saines de la racine par les nématodes libérés dans le sol du fait de la destruction des tissus se produirait alors (Hugon & Picard, 1988).

Tenant compte de toutes les interactions possibles entre les nombreux microorganismes présents dans le sol (Loridat, 1989), il est difficile d'attribuer ces symptômes à des parasites spécifiques à partir d'échantillons prélevés en pleine terre dans les bananeraies. Okech *et al.* (2002) observent des taux de nécrose racinaire faibles, alors que les densités de population de nématodes (*Pratylenchus goodeyi* principalement) sont élevées. Notons toutefois, qu'il n'existe pas toujours de corrélation tangible entre la présence des nématodes et le poids du régime ou les dommages observés au niveau des racines (Batlle-Viera & Perez-Vincente, 2002 ; Araya & De Waele, 2005 ; Gaidashova *et al.*, 2004b).

I.5.*2.2.2*- Productivité à la parcelle

La productivité est une donnée difficile à obtenir, car les agriculteurs ne notent presque jamais le poids des régimes récoltés par parcelle. Le rendement d'une parcelle est d'autre part difficile à déterminer par voie d'enquête (Perrieux & Delvaux, 1991). Il est surtout affecté par les pertes avant récolte (Pierrot *et al.*, 2002). Certains auteurs démontrent que le rendement peut être déterminé par le nombre de doigts du régime (Delvaux, 1990), essentiellement lié à la croissance et à leur remplissage (Pierrot *et al.*, 2002). Ce dernier auteur indique que, le nombre de doigts s'est révélé étroitement lié à la circonférence du pseudotronc à la floraison. Pour d'autres, le poids du régime est fortement corrélé à la circonférence du pseudo-tronc (Lossois, 1963 ; Delvaux *et al.*, 1986 ; Yamaguchi & Araki, 2004) ou au nombre de mains (Ssali *et al.*, 2003). Il a été démontré, récemment, qu'il existe une étroite relation entre la circonférence, le nombre de doigts et le poids du régime (Auguste, 2011). De toute évidence, ces deux paramètres (circonférence et nombre de doigt/régime) du rendement semblent incontournables pour estimer la productivité des bananiers plantains, lors des diagnostics rapides.

Cependant, face aux contraintes de l'environnement (climat, altitude, sol), ces paramètres ne répondent pas tous de la même façon (Dorel & Perrier, 1990). Dans une enquête-diagnostic, ces auteurs ont montré que la productivité des bananeraies (dessert) est fortement dépendante des facteurs pédo-climatiques. Ces facteurs déterminent le niveau des contraintes sur l'appareil souterrain (physiques, hydriques et biotiques). C'est probablement pour ces raisons que ces auteurs ont procédé de diverses manières pour estimer le rendement dans les plantations de bananes et plantains. Notons que le rendement d'une parcelle est déterminant dans la décision de l'agriculteur, pour maintenir ou renouveler la plantation.

Voilà pourquoi, nous avons jugé utile de prendre en compte le rendement dans notre outil de diagnostic agro-écologique.

Toutefois, il importe de noter que la productivité d'une parcelle est liée aux pratiques culturales, à la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol et à l'état phytosanitaire de la parcelle. Ce qui nous amène à évaluer l'état phytosanitaire de la parcelle de plantains ; cet indicateur permettra de déterminer la viabilité et la durabilité de la plantation. Cette dernière sera testée dans le cadre d'une expérimentation au champ en station de recherche.

I.6- « L'EXPÉRIMENTATION SYSTÈME » COMME CADRE CONCEPTUEL POUR LE TEST DE PRATIQUES INNOVANTES

Au cours de ces cinquante dernières années, l'homme a généré des modifications au niveau des écosystèmes de manière plus rapide et plus intensive qu'à aucune autre période de l'histoire de l'humanité. Ces modifications se font, en grande partie pour satisfaire une demande croissante en matière de nourriture, eau douce, fibre, bois de construction et énergie (Meynard *et al.*, 2005). Celles-ci ont eu pour conséquence, une perte substantielle de la diversité biologique édaphique qui suscite beaucoup d'interrogations dans le monde scientifique (notamment chez les agronomes et les écologues).

Selon les propos de J.M. Meynard dans INRA magazine (octobre 2012), *l'expérimentation système* serait apparue au cœur des années 80, une période durant laquelle les agronomes et zootechniciens ont pressenti que tout ne pouvait pas être prévu, ni compris, en découpant la réalité en morceaux de plus en plus petits. Signalons que, les résultats des premières expérimentations systèmes ont été publiés dans des revues de second rang ou des chapitres d'ouvrages, avant que ce concept soit entré progressivement dans la boîte à outils des concepteurs (rapport de la mission INRA, 2006).

Aujourd'hui, des expérimentations systèmes sont développées dans un nombre croissant d'unités expérimentales, sur des productions très diverses. Les systèmes testés mobilisent les concepts et connaissances de l'agro-écologie. Selon Meynard & Spain (2008), une expérimentation système vise à tester au champ la capacité des systèmes de culture innovants à atteindre les objectifs pour lesquels ils ont été conçus. Autrement dit, ces systèmes doivent permettre de répondre aux objectifs du développement durable (Reau & Doré, 2008).

Mentionnons en outre que, Debaeke *et al* (2008) analysent les apports et les limites d'expérimentations-systèmes pluriannuelles conduites dans des stations expérimentales. La difficulté de réaliser des expérimentations systèmes à l'échelle de l'exploitation ou du territoire amène plutôt à pratiquer, à ces échelles, la conception pas à pas. Selon ces auteurs, les objectifs d'une expérimentation "système de culture" peuvent être multiples. L'objectif principal est d'évaluer le système de culture étudié :

(i) en termes de faisabilité technique et de cohérence agronomique, en analysant la capacité des stratégies de gestion mises en œuvre à atteindre les états du sol et des cultures visés (résultats agronomiques comme la maitrise des bioagresseurs, l'alimentation minérale des cultures) ;

(ii) en termes d'étude de la capacité du système de culture dans son ensemble à atteindre les objectifs initiaux qui lui sont assignés lors de la conception (résultats techniques et économiques pour l'agriculteur) ;

iii) en termes de contribution au développement durable, en s'intéressant aux performances économiques, sociales et environnementales du système de culture, au-delà des résultats techniques et des objectifs initiaux fixés par rapport à un seul enjeu local de qualité de l'eau par exemple.

L'évaluation globale des systèmes de culture en expérimentation selon ces 3 niveaux permet d'identifier des systèmes de culture prometteurs performants, et d'éventuels antagonismes entre enjeux de la durabilité qui n'auraient pas été envisagés lors de la conception (Debaeke *et al.*, 2008, 2009).

Le diagnostic agronomique en soi, base des démarches pas à pas, permet de générer des connaissances alimentant les expérimentations système (Loyce *et al.*, 2008 ; Debaeke *et al.*, 2008) et cadrant les orientations d'une conception participative (Lançon *et al.*, 2008). Aussi, les indicateurs agro-écologiques sont utilisés pour l'évaluation *ex ante* et *ex post* des systèmes innovants, aussi bien dans les expérimentations systèmes que dans les parcelles d'agriculteurs (Mischler *et al.*, 2008).

Ce qui fait l'originalité d'une expérimentation « système de culture », c'est que l'on teste, non plus des techniques isolées, mais un ensemble de techniques cohérentes entre elles, formant des systèmes de culture et/ou d'élevage. Aussi, les traitements ne sont pas définis à l'avance et figés sur le papier, mais se présentent sous forme de règles d'action qui permettront au moment voulu d'adapter le choix technique à la situation. Cette approche constitue la base de la compréhension de plus en plus fine de ce qui détermine la production et ses conséquences sur l'environnement.

Pour ces motifs, les systèmes de culture innovants et durables doivent s'adapter à l'évolution des enjeux et des contraintes des filières et territoires. Comment produire les références nécessaires aux agriculteurs et aux agronomes qui accompagnent ces transformations ? Les travaux réalisés au cours des dix dernières années ont permis de proposer des systèmes de culture innovants mais aussi d'améliorer les méthodes pour produire ces références agronomiques (Meynard & Spain, 2008). Cependant, aucun de ces travaux n'ont fait, à ce jour, l'objet d'une étude des systèmes de culture à base de plantains dans les deux régions de notre étude : Guadeloupe et Haïti.

PARTIE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

PARTIE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. GEOGRAPHIE ET CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DES ZONES D'ETUDE

L'étude met en jeu des démarches complémentaires visant à l'amélioration de la production agro-écologique du plantain en Haïti et en Guadeloupe, toutes deux situées respectivement au nord et au centre de l'Arc Insulaire des Caraïbes (fig. 3). Le tableau 2 ci-après, présente une comparaison entre les caractéristiques pédoclimatiques et des données relatives à la culture du bananier plantain dans ces 2 régions.

Figure 3 : Image satellite situant Haïti et la Guadeloupe dans l'Arc Antillais

En Guadeloupe, les *andosols*, les *ferralsols* ainsi que les *nitisols* sont des sols qui conviennent parfaitement à la culture du plantain (fig. 4). Voilà pourquoi, cette culture est prédominante sur l'île de Basse-Terre, et plus particulièrement dans le « croissant bananier » bénéficiant d'un régime de précipitations élevé (fig. 4). De même, les sols à alluvions d'Haïti (issus de roches sédimentaires couvrant plus de 80% du territoire) favorisent la culture du plantain ; celle-ci est fortement concentrée dans la plaine de l'Arcahaie (fig. 5).

L'évolution dépressionnaire lors de la saison humide, dans ces 2 régions, donne régulièrement naissance à des cyclones, générant des pluies à caractère torrentiel pouvant conduire à des inondations importantes et des glissements de terrain. Les vents accompagnant ces phénomènes peuvent entraîner des pertes élevées de récoltes (cassure des pseudo-troncs) dans les plantations de bananes plantains. Et, lorsque les plants sont fragilisés par les attaques des ravageurs telluriques (charançon noir et nématodes phytoparasites), on assiste à la verse massive des bananiers, sous l'action des rafales de vent. Les pertes de cultures enregistrées en Haïti, durant ces phénomènes, sont cependant, plus catastrophiques pour les paysans. Ceci est

dû en majeure partie à la disparition du couvert végétal haïtien, estimé à 2%, et à l'érosion des sols en résultant.

Comme mentionné précédemment, la plaine de l'Arcahaie est aujourd'hui connue et reconnue pour sa production de plantains. Cette commune assure près de 25% de la production nationale et plus de 60% de la consommation de plantains à Port-au-Prince (la Capitale d'Haïti, située à 35 Km). Rappelons que, plus de 70% de la superficie cultivée est consacrée principalement à la culture du plantain. C'est pour cette raison que nous avons fait le choix de cette région qui constitue une zone productrice incontournable pour notre étude.

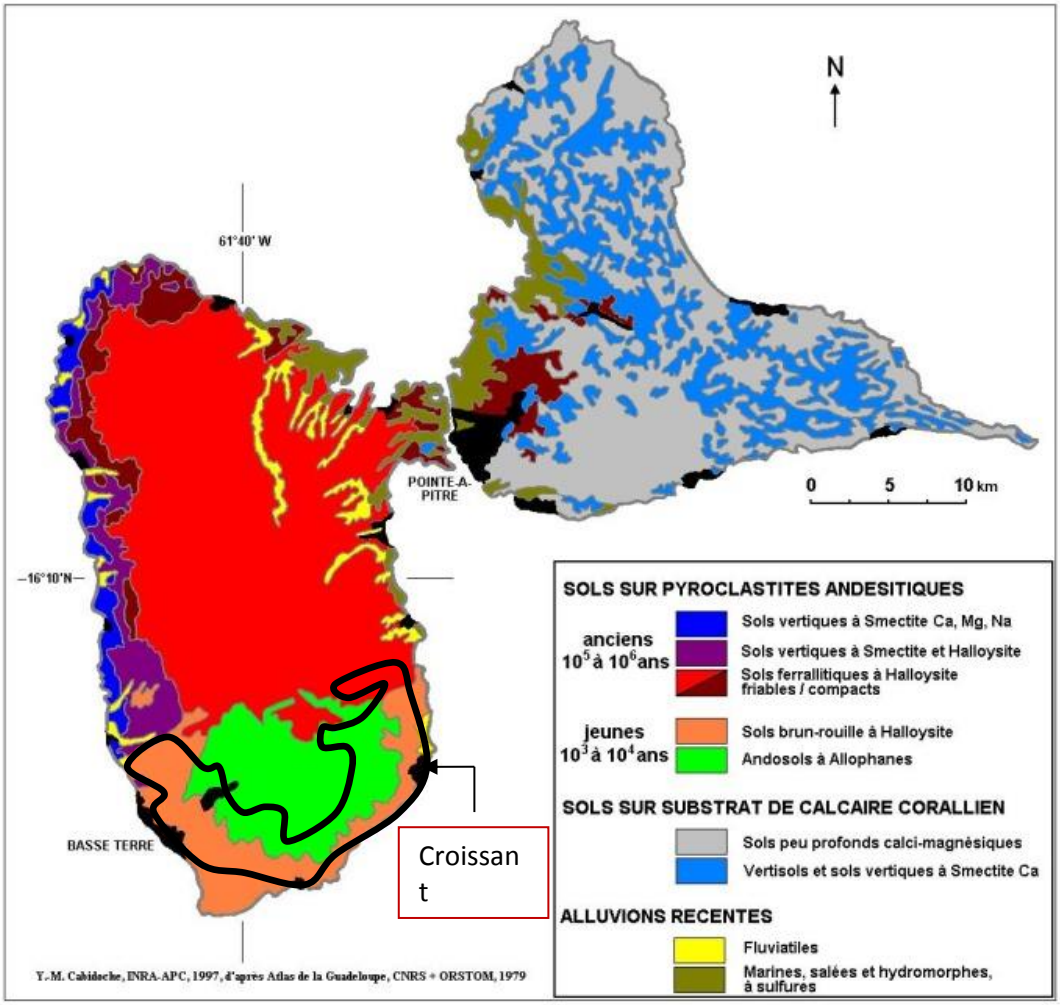
Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des 2 régions d'étude : Guadeloupe, Haïti

Variables	Guadeloupe	Haïti
Coordonnées géographiques	16° de latitude Nord et 61° de latitude Ouest	19° de latitude Nord et 72° de latitude Ouest
Caractéristiques pédoclimatiques	- *Ferralsols*, *Andosols*, nitisols, *sols brun-rouille* à halloysite *vertisols*, *sols à alluvions* etc. (fig.4) - Climat tropical humide (25 °C et 75 à 80% d'humidité en moyenne) ; -Pluviométrie annuelle : 1500 et 2000mm - 2 saisons : humide (hivernage) *de juin à novembre et sèche (carême) de décembre à mai*	- Sols à alluvions ou calcaires (classification FAO) et sols d'origine volcanique - Climat tropical (27°C sur le littoral et 18-22°C en montagnes) - Pluviométrie annuelle varie selon les régions entre 514-910mm (saison sèche) et 1200-2660 mm (saison pluvieuse) - *2 périodes pluvieuses* : l'une qui dure *d'avril à juin* et l'autre *d'août à octobre* et *une période sèche* allant de *décembre à mars*
Principales communes de production	Goyave, Capesterre, Petit Bourg, Gourbeyre, Sainte Rose, Baie Mahault, Lamentin	Marigot, Belle-Anse, Jacmel ; Arcahaie, Cabaret, Petit-Goave, Grand-Goave, Léogane, Croix des Bouquets,
Extension des surfaces en plantain	400 hectares en 2012 (FAOStat, 2014)	40 000 hectares en 2012 (FAOStat, 2014)
Taille des exploitations enquêtées	Min = 0,10 ha / Max = 10 ha Moy = 1,67 ha / Ecartype = 1,66	Min = 0,16ha/ Max = 29,67ha Moy= 3,94 / Ecartype = 4,15
Nombre d'exploitations enquêtées	Basse terre : 76 exploitations et 113 parcelles plantées en plantains	Arcahaie : 100 exploitations et 494 parcelles plantées en plantains

.

Mentionnons en outre que l'Arcahaie est une plaine côtière dominée par des sols formés de dépôts de sédiments marins récifaux d'âge quaternaire, recouverts en majeur partie par les alluvions des rivières (Courjolles, Torcelle et Bretelle). Il en résulte des sols, en

général, très hétérogènes, allant des sols profonds riches en humus (ayant une bonne capacité de rétention en eau) aux sols marécageux favorables à la riziculture.



22

Figure 4 : Carte des sols de Guadeloupe (d'après Cabidoche, 1997)

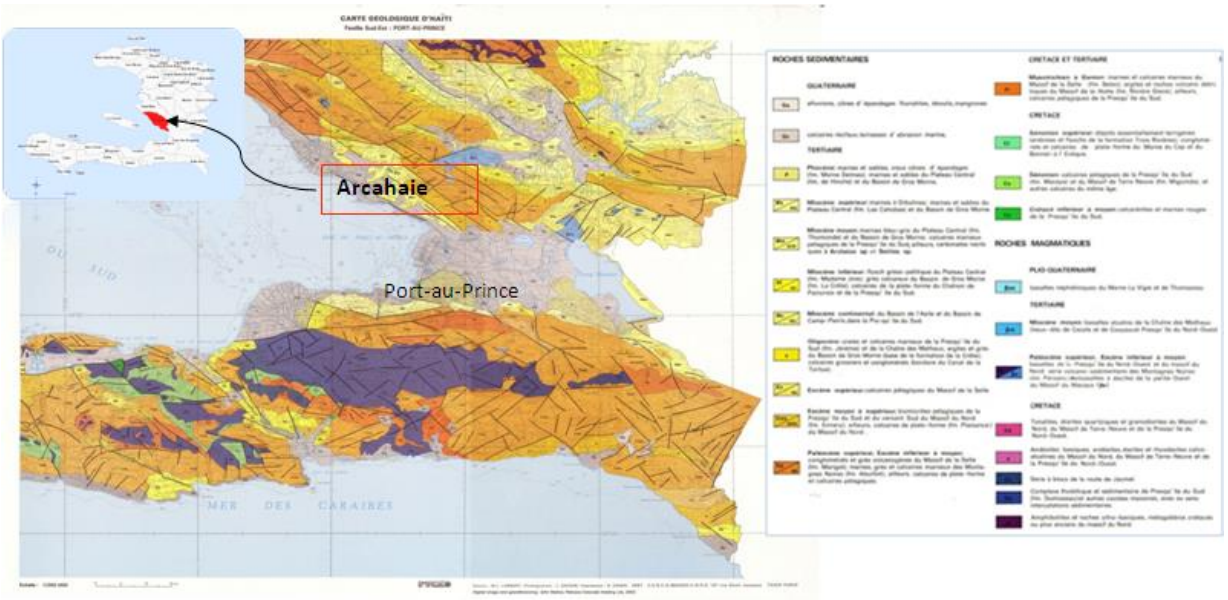


Figure 5 : Carte géologique d'Haïti (d'après bureau des mines et de l'énergie d'Haïti) et localisation de l'Arcahaie

II.2. DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE

II.2.1- ENQUÊTE AGRI-ENVIRONNEMENTALE

Pour réaliser un diagnostic agro-écologique à l'échelle de la parcelle, il est nécessaire de mener au préalable une enquête agri-environnementale dans les deux zones d'intervention de notre étude, à savoir la Guadeloupe et Haïti (*cf* feuille d'enquête, annexe I). Cette enquête a pour objet d'appréhender les potentialités et faiblesses des systèmes de culture plantains autour de différents critères : i) conditions socio-économiques des exploitations agricoles, ii) logiques et pratiques de production (ou itinéraires techniques), iii) rentabilité économique et iv) environnement biophysique des systèmes de culture de plantain. Ce travail, réalisé en amont (Tableau 3), vise à effectuer un choix de parcelles au sein desquelles le diagnostic agro-écologique sera réalisé (annexe II).

Tableau 3: Enquête agri-environnementale réalisée dans les deux zones d'étude

Variables	Guadeloupe	Haïti
Nombre d'exploitants	76 exploitants, représentatifs des producteurs de plantains (Forite, 2011 ; Ogisma 2011).	100 exploitants, représentatifs des producteurs de plantains
Période d'enquête	Mars à avril 2011	Octobre à décembre 2011
Zone enquêtée	Basse-Terre (croissant bananier)	Plaine de l'Arcahaie

II.2.2- CHOIX DES PARCELLES POUR LE DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE

Le traitement des données de la pré-enquête agri-environnementale a permis la sélection de 23 parcelles (annexe III) représentant la diversité des exploitations étudiées au début de l'année 2011 en Guadeloupe (Forite, 2011 ; Ogisma, 2011). Compte-tenu des problèmes logistiques, seules 12 parcelles (annexe IV), représentant la diversité des exploitations enquêtées en fin de l'année 2011 en Haïti, ont été retenues. Ainsi, les parcelles choisies dans ces deux régions ont fait l'objet de notre diagnostic agro-écologique (voir tableau 4 ci-après).

Au cours de ce diagnostic, 2 composantes : fertilité du sol et rendement, ont été mesurées dans les deux régions de notre étude (tableau 8 ci-après). La composante de la fertilité du sol regroupe 4 sous-composantes (biologique, morphologique, chimique et parasitaire) alors que celle du rendement est estimée à partir de la circonférence du pseudotronc prise à 1 m du sol.

Tableau 4 : Les critères retenus pour le choix des parcelles

Critères	Guadeloupe	Haïti
Type de sols	*Nitisols*, *Andosols* et *Ferralsols* : relativement proches de par leurs caractéristiques physico-chimiques (sols rouges tropicaux ayant une faible proportion en argiles 2/1)	*Sols alluviaux* (classification FAO) et *Nitisols*
Précédent cultural	Banane pérenne : ≥ 4 cycles Plantations plantains au 1er ou 2ème cycle, précédées de : ananas ou jachère ou banane	Plantations plantains au 1er ou 2ème cycle, précédées de : manioc ou jachère ou banane
Niveau d'intensification	**Faible intrant** : Engrais chimique et/ou organique ≤ 2 apports/cycle 0 à 2 applications d'herbicide /cycle; **Fort intrant** : Engrais chimique ≥ 3 apports /cycle ; Herbicides ≥ 3fois /cycle ; Nématicide/insecticides : à la plantation	**Zéro intrant** : Aucun apport d'intrants ; **Faible intrant** : Engrais chimique : ≤ 2 fois/cycle ; herbicides 0 fois/cylcle : désherbage toujours manuel) Nématicide/insectides : 0 ou 1 application à la plantaion
Nombre de parcelles/systèmes de culture	Précédent-Banane/fort intrant : 5 parcelles Précédent-Banane/faible intrant : 2 parcelles Précédent-jachère/fort intrant : 6 parcelles Précédent-jachère/faible intrant : 2 parcelles Précédent ananas/fort intrant : 4 parcelles Précédent-ananas/faible intrant : 1 parcelle Banane-pérenne/faible intrant : 3 parcelles	Précédent-Banane/faible intrant : 2 parcelles Précédent-jachère/faible intrant : 5 parcelles Précédent-Banane/zéro intrant : 3 parcelles Précédent-manioc/zéro intrant : 2 parcelles
Période d'échantillonnage	Février à mars 2012	Août 2012

Précisons que, dans la sous-composante biologique, la variable *macrofaune* regroupe l'abondance des différents groupes taxinomiques (Oligochaeta, Diplopoda, Formicidae,

Isoptera, Hymenoptera, Dictyopera, Dermaptera, Isopoda, Chilopoda, Arachnida, Orthoptera, Coleoptera « larves et adultes », Heteroptera, Diptera Larvae, Lepidoptera Larvae, Gasteropoda, Homoptera) qui ont été identifiés au cours de ce diagnostic.

Tableau 5 : Présentation des variables des composantes du sol dans les deux régions d'étude

	Composantes	
	Fertilité du sol	**Rendement**
Guadeloupe	- **Biologie** : abondance des groupes taxinomiques de la macrofaune, abondance de la macrofaune totale, diversité taxinomique de la macrofaune, abondance de spores de mycorhizes ; - **Morphologie** : Agrégats du sol « biogéniques, physiques, racinaires », sol non agrégé ; - **Chimie** : pH_{H2O}, pH_{KCl}, C_{tot}, N_{tot}, P, K^+, Na^+, Mg^{++}, Ca^{++}, N-NH_4, N-NO_3, CEC ; - **Parasites** : Nématodes du sol, galeries des larves de charançons au niveau du bulbe	Circonférence du pseudotronc à 1 m du sol
Haïti	- **Biologie** : abondance des groupes taxinomiques de la macrofaune**,** abondance de la macrofaune totale, diversité taxinomique de la macrofaune ; - **Chimie** : pH_{H2O}, C_{tot}, N_{tot}, P, K^+, Na^+, Ca^{++}, CEC ; - **Parasites** : Nématodes du sol et nécroses foliaires	Circonférence du pseudotronc à 1 m du sol

II.2.3- DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE

Afin d'éviter tout effet de bordure, l'ensemble des prélèvements a été effectué à l'intérieur des parcelles de bananiers plantains, au moins à 5 m des bordures ; de plus, une distance de 10 mètres entre les plants échantillonnés a été préconisée. La figure 6, ci-dessous, nous montre le dispositif d'échantillonnage qui a été appliqué dans chaque parcelle retenue. Cinq bananiers (au même stade floraison) ont été sélectionnés, suivant un **W**, et marqués à l'aide d'un ruban.

Figure 6 : Dispositif d'échantillonnage suivant un W délimitant les 5 points ( ) de prélèvements

II.2.4- ÉCHANTILLONNAGE DES INDICATEURS DE LA QUALITE DU SOL

À 30 cm de chaque bananier marqué, un prélèvement est effectué à l'aide d'un cadre métallique de 25×25×20 cm de profondeur (point central : C ; fig. 7). Le sol et la litière sont triés pour récupérer la macrofaune et les racines. La macrofaune est conservée dans des flacons étiquetés de 150 ml contenant de l'alcool à 70%, tandis que les racines sont mises dans des sacs plastiques étiquetés.

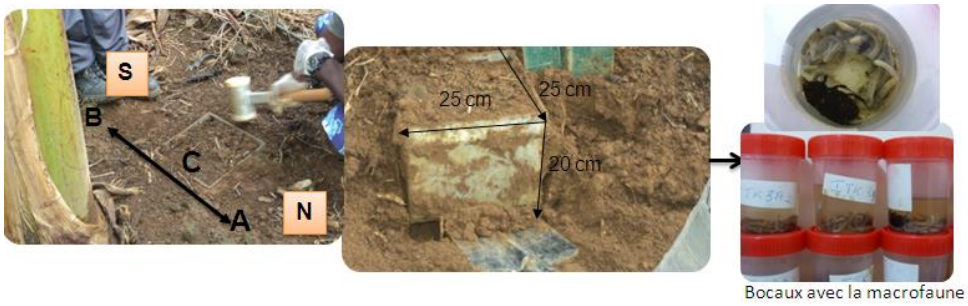


Figure 7 : Les étapes de l'échantillonnage macrofaune / racines / sols avec le cadre 25×25×20cm

Le sol est ensuite mélangé délicatement afin d'obtenir un échantillon homogène. De ce dernier sont prélevés : i) 300 g de sol pour effectuer les analyses chimiques : pH_{H2O}, pH_{KCl}, C_{total} et N_{total}, Ptotal, Cations échangeables « K^+, Na^+, Ca^{++}, Mg^{++} » ; ii) 300 g de sol frais pour les analyses d'azote minéral (NO_3^-, $NH_4^{+)}$; et iii) 300 g de sol pour l'extraction des nématodes du sol et des spores de mycorhizes. Chacun de ces sous-échantillons est mis dans des sacs plastiques étiquetés et conservés dans une glacière sur le terrain, avant d'être acheminés au laboratoire.

A proximité du point **C** (interligne côté porteur), soit 1 m au Nord (N) et 1m au Sud (S) (*cf*. fig.7), la macrofaune (sol et litière) est prélevée à l'aide d'un autre cadre de 25×25×10 cm de profondeur. Il en résulte deux échantillons **A** et **B** (fig. 8) dans lesquels la macrofaune est triée puis conservée de la même façon que précédemment. Ainsi, sur les 5 bananiers échantillonnés, 15 échantillons de macrofaune par parcelle ont été prélevés à raison de 3 échantillons par plants (C, A et B).

Figure 8 : Échantillonnage macrofaune A/B avec le cadre 25×25×10cm

À 50 cm de chaque bananier choisi, un cylindre de volume connu (427 cm^3) de sol est prélevé puis mis délicatement dans un sac plastique étiqueté (fig.9). L'échantillon est ensuite conservé au frais dans une glacière avant d'être transporté au laboratoire. Ces échantillons permettront d'effectuer l'analyse morphologique des agrégats du sol (voir III.2.5.4).

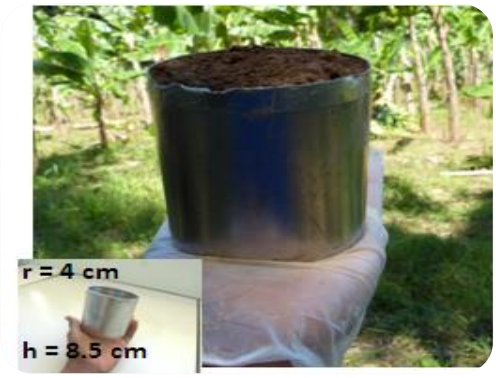


Figure 9 : cylindre d'échantillonnage des agrégats du sol (la morphologie)

II.2.5- ANALYSES DES ECHANTILLONS AU LABORATOIRE

III.2.5.1- Analyses chimiques du sol

Les pH_{H2O} et pH_{KCl} ont été déterminés, sur du sol sec tamisé à 2 mm, par la méthode électrochimique (NF ISO 10390, 1994). Le dosage du pH du sol se fait à l'aide d'une électrode en verre dans une suspension diluée à 1/5 ou 1/2.5 (v/v) de sol dans l'eau déminéralisée ou dans du chlorure de potassium (KCl) à 1M pendant 2 heures.

L'azote minéral ($N0_3^-$ et NH_4^+) est dosé sur des extraits de sol au KCl 0,5 M. Pour le $N0_3^-$, les densités optiques des extraits de sol colorés sont mesurées à 550 nm sur une chaîne d'analyse en flux continu. Pour le NH_4^+, la densité des solutions colorées est mesurée à 660nm sur une chaîne d'analyse de cations échangeables à pH 7 (norme NF X 31108).

La détermination de la teneur totale en azote (N) et en carbone (C) se fait par combustion sèche (ISO 13878, 1998) à 1000°C en présence d'oxygène d'un échantillon de sol tamisé à 0,2 mm. Puis, le dosage du N_2 et du CO_2 libérés est réalisé à l'aide d'un analyseur élémentaire carbone azote (NC 2100 Soil CE instruments). Le dosage du carbone organique se fait après la combustion sèche (analyse élémentaire, ISO 10694, 1995).

Les cations échangeables ont été déterminés sur du sol sec tamisé à 2 mm. Ces cations sont extraits par agitation de la prise d'essai en présence d'une solution d'acétate d'ammonium 1M à pH 7 avec un rapport d'extraction 1/20 (m/v). Les cations (Ca, Mg, K, Na) sont ensuite dosés au Spectromètre de flamme en absorption atomique (AA FS240 de Varian).

La détermination de la capacité d'échanges cationiques (CEC) à pH 7 se fait sur du sol sec tamisé à 2 mm. Les cations du sol sont déplacés par percolation de 2,5 g de sol à l'aide de 70 ml d'une solution d'acétate d'ammonium (CH3COONH4) 1M à pH 7. Puis, après rinçage à l'alcool, l'ammonium fixé est déplacé par agitation pendant 1 heure dans 50 ml d'une solution de NaCl 1 M. Après filtration sur filtre sans cendre Whatman n° 40, l'ammonium fixé est dosé par colorimétrie sur un Autoanalyseur Bran-Luebbe III selon la méthode de Searle (1984).

La détermination du phosphore assimilable est réalisée selon la méthode d'Olsen Dabin (1963). Le phosphore est solubilisé au moyen du réactif d'Olsen modifiée (mélange de bicarbonate de sodium 0,5 N et de fluorure d'ammonium 0,5 N à pH 8,5), celui-ci convient mieux à l'extraction du phosphore assimilable dans les sols tropicaux que le réactif de Truog (Travaux de Jackson *et al.*, 1964). Puis, le phosphore libéré est dosé par colorimétrie selon la méthode de Duval (1963). En milieu sulfurique, le molybdate d'ammonium réagit en donnant le complexe phosphomolybdique, qui est ensuite réduit par un excès d'acide ascorbique à chaud avec développement d'un complexe bleu, bleu de molybdène absorbant à 660 nm.

II.2.5.2- Analyse de la macrofaune

Au laboratoire, les échantillons **de la macrofaune du sol et de litière** sont d'abord identifiés et séparés en grands groupes taxonomiques sous loupe binoculaire). Une fois identifiés, les individus ont été classés par grands groupes fonctionnels (Turbé *et al.*, 2010) : ingénieurs du sol, transformateurs de litière et prédateurs.

II.2.5.3 Analyses nématologiques

II.2.5.3.1- Extraction et comptage des nématodes du sol

Les nématodes ont été extraits du sol par la méthode de « l'élutriation » (Seinhorst, 1962). Cette méthode (fig. 10) consiste à séparer les nématodes des particules plus denses à travers une colonne d'eau parcourue par un courant ascendant. Après l'élutriation, les échantillons sont soumis à la filtration de Baerman (Hooper, 1986), méthode (fig. 10) permettant de récupérer les nématodes vivants dans l'eau. Puis, les nématodes sont identifiés et dénombrés sous microscope à fond inversé.

Figure 10 : Les étapes d'extraction de nématodes du sol par élutriation et filtration Baerman

II.2.5.3 .2- Calcul de l'Indice de Nécrose Racinaire « INR »

L'indice de nécrose racinaire (INR) a été calculé seulement pour les échantillons de racines provenant de l'expérimentation en station de recherche. Pour ce faire, 20 racines de 15 à 20cm de longueur (Ø > 4mm) sont lavées à l'eau, puis réparties en plusieurs lots en fonction du pourcentage de nécroses. Une note allant de 0% (racines saines), [1-25%], [26-50%], [51-75%] à 100% (racines complètement nécrosées) est donnée aux racines observées (Quénéhervé, 1990 ; Speijer & De Waele, 1997 ; Araya & De Waele, 2005). Puis, l'indice de nécrose racinaire « INR » est calculé grâce à la formule ci-après (équation1). Les lettres u, v, w, x et y représentent le nombre de racines notées de 0 à 100% nécrosées :

$$\mathbf{INR}_{(\%)} = \frac{(u*0+v*0.125+w*0.375+x*0.625+y*0.875)}{u+v+w+x+y}*100 \quad (1)$$

avec : 0 < INR < 0.875

II.2.5.3 .3- Extraction et comptage des nématodes des racines

Les racines à partir desquelles on calcule l'INR ont été utilisées pour extraire les nématodes vivants qui s'y trouvaient. A cet effet, elles sont découpées en petits tronçons de 0,5 cm et pesées, puis disposées sur un tamis artisanal de 2 mm, qui est déposé sur un entonnoir relié avec un tuyau. Le tout est ensuite posé sur un flacon qui est ensuite placé en chambre de brumisation pendant 2 semaines d'après la méthode de Seinhorst (1950) (fig. 11). Un jet d'eau est envoyé sur les échantillons pendant une minute, toutes les 5 minutes ; les nématodes sortent progressivement des racines pour se retrouver dans le flacon. L'identification et le dénombrement des nématodes ont été réalisés respectivement 8 et 15 jours après le début de l'extraction, à l'aide d'un microscope à fond inversé et d'une planche de reconnaissance.

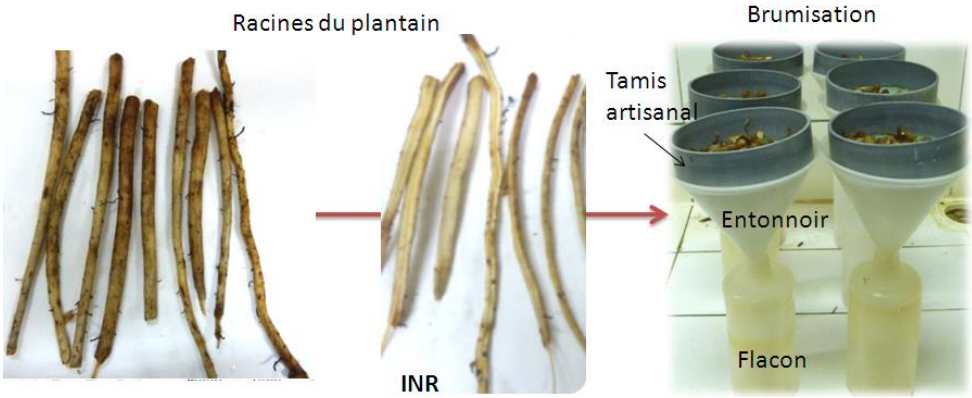


Figure 11 : Les étapes d'extraction de nématodes des racines du plantain

II.2.5.3- Analyse des spores de mycorhizes

Les spores ont été extraites par centrifugation au saccharose (Sidibé, 1993). Cette méthode (fig. 12) consiste à mélanger dans un bécher 100 g de sol avec 1 litre d'eau. La solution obtenue est agitée puis filtrée à travers une colonne de tamis superposés (250, 75 et 40 µm). Les refus des deux derniers tamis sont récupérés délicatement, à l'aide d'un jet d'eau, dans un tube à centrifuger. Les échantillons sont centrifugés à 2000 trs/mn pendant 10 minutes. Le surnageant des tubes est éliminé puis, remplacé par une solution de saccharose à 50% (p : v) et centrifugé à nouveau à 2000 trs/mn pendant 10 minutes. Les spores sont ensuite récupérées dans l'eau et comptées sous loupe binoculaire.

Figure 12 : Les étapes d'extraction et comptage de spores de mycorhizes

II.2.5.4- Analyse de la morphologie du sol

La procédure appliquée ici est une version simplifiée de la méthode mise au point par Velasquez *et al.* (2007b). Au laboratoire, les échantillons sont tamisés à travers d'un tamis de 4 mm (fig. 13). Le sol non agrégé (< 4 mm) est recueilli dans une barquette. Le refus du tamis est placé sur du papier filtre préalablement disposé sur un plan de travail propre.

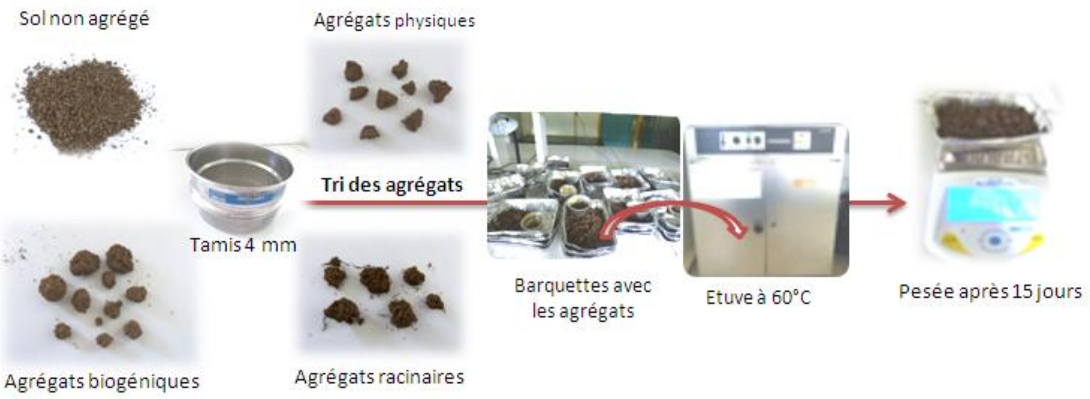


Figure 13 : Différentes étapes de l'analyse morphologique des agrégats du sol

Les composants naturels du sol sont délicatement séparés visuellement et classés en 6 catégories (fig. 13) :

- les *agrégats biogéniques* de forme arrondie : petits (<1cm), moyens (1-3cm), et gros (>3cm) créés par les ingénieurs de l'écosystème (*vers de terre essentiellement*) ;
- les *agrégats physiques* de forme anguleuse (petits, moyens et gros) produits par les processus physico-chimiques et bactéries ;
- les *agrégats racinaires*, ceux adhérant aux racines après agitation
- Les *petits agrégats* et le *sol non agrégé* (< 4 mm) ;
- les *débris organiques* : racines, feuilles, fragments de tige, graines, morceaux de bois et invertébrés ;
- Les *cailloux* dont la taille est comprise entre 0.5 et 10 cm.

Les agrégats et les autres éléments sont mis dans des barquettes étiquetées puis séchés à l'étuve pendant 15 jours à 60°C ; ils sont ensuite pesés. Tous les échantillons sont traités par une même personne afin d'éviter de biaiser les résultats.

II.2.6- PROBLEMES PHYTOSANITAIRES AERIENS ET TELLURIQUES

II.2.6.1- État phytosanitaire aérien de la parcelle : Cercosporioses

Sur chaque parcelle échantillonnée au stade de floraison, nous avons observé le feuillage du peuplement pour estimer le pourcentage de nécroses foliaires dues principalement à la Cercosporiose noire (apparue depuis 1990 en Haïti et très récemment, en 2011, en Guadeloupe) (fig. 14). De manière générale, le premier symptôme apparaît sur la face supérieure du limbe sous la forme de : *tirets jaune pâle ou marron foncé sur la face inférieure du limbe de 1 à 2mm de long,* qui s'élargissent pour former des *lésions nécrotiques à halo jaune et centre gris clair*. Une note varaint de 0 (les feuilles de l'ensemble des plants de la parcelle sont saines) à 25, 50, 75, 100 % (les feuilles de l'ensemble des plants de la parcelle sont nécrosées) est donnée pour la parcelle en fonction du niveau d'infestation du peuplement.

Figure 14 : Nécroses foliaires dues à la Cercosporiose noire dans une plantation de plantains en Haïti

II.2.6.2- *État phytosanitaire tellurique : charançon du bananier*

Un diagnostic des dégâts causés par les larves de charançons est réalisé sur cinq bananiers après la récolte de leur régime. Le bulbe est d'abord déterré à l'aide d'une pince (ou barre à mine) puis, sectionné en deux à l'aide d'un coutelas. La section la plus infestée est photographiée d'une part, le diamètre du bulbe et les galeries formées, sont mesurés à l'aide d'un ruban métrique d'autre part (fig. 15). Une note de 0 (bulbe sain), 25, 50, 75 à 100% (bulbe complètement nécrosé) est donné à chaque plant échantillonné. Ce diagnostic a été réalisé uniquement dans les parcelles diagnostiquées en Guadeloupe et, également dans notre expérimentation réalisée en station de recherche.

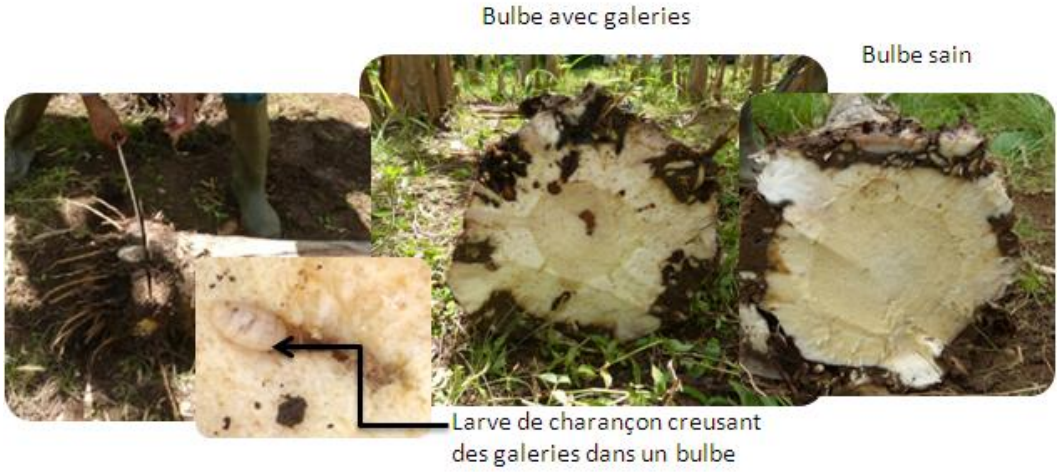


Figure 15 : Vue d'une coupe transversale d'un bulbe infesté par les larves de charançon et d'un bulbe sain

L'évaluation des dégâts dus aux charançons a été réalisée de deux façons :

i) A l'aide des mesures faites sur la section du bulbe la plus infestée, nous avons calculé l'infestation par plant grâce à l'équation 2 suivante :

$$\textbf{Pourcentage d'infestation}_{\text{(larves de charançons)}} = \frac{\text{surface totale des galeries (cm}^2\text{)}}{\text{surface observée (cm}^2\text{)}} * 100 \quad (2)$$

ii) A l'aide d'un logiciel de traitement d'images, en l'occurrence « MESURIM », nous avons évalué également le niveau d'infestation sur l'ensemble des photos des bulbes qui ont été prises sur le terrain.

Afin d'avoir une estimation la plus fiable possible des dégâts causés par les larves de charançon noir dans ces parcelles, nous avons fait une moyenne des résultats de ces deux méthodes utilisées.

II.2.7- NIVEAU DE PRODUCTIVITÉ DE LA PARCELLE

La productivité des parcelles échantillonnée, lors du diagnostic agro-écologique, a été estimée (au stade de floraison dans les 2 régions d'étude) via la circonférence du pseudotronc (prise à 1 m du sol) qui est une sous composante, étroitement liée au rendement. En Guadeloupe, nous avons utilisé les mesures de productivité effectuées par Auguste (2012) sur les mêmes parcelles au cours de la même période que celle de nos travaux afin de comparer le rendement en fonction des systèmes de culture. Dans son travail, l'évaluation de la productivité est effectuée via le nombre de doigts par régime et la circonférence du pseudotronc selon l'équation 3 suivante (avec $R^2 = 0.81$) :

Rendement $_{\textbf{estimé}\ (Kg)}$ = 0,128*Nombre de doigts + 0,667*Circonférence (cm) – 29,224 **(3)**

Figure 16 : Vue de la récolte du 1er cycle de l'expérimentation semi-contrôlée en champ

Dans la partie expérimentale de notre étude, nous avons évalué la productivité effective de chaque traitement via le poids des régimes récoltés (fig. 16). De plus, celle-ci a été également appréciée via la circonférence du pseudotronc et le nombre de doigts par régime. Ces mesures ont permis de constater que l'équation d'Auguste tend à sous-estimer les valeurs observées (fig. 17). Elles ont en outre permis d'établir une 2ème équation (4) permettant d'estimer le rendement du plantain à l'aide de la circonférence et le nombre de doigts par régime (avec $R^2 = 76$) :

Rendement $_{\textbf{estimé}\ (Kg)}$ = -32,74+ 1,15*circonférence (cm) – 0,11*nombre doigts/régime **(4)**

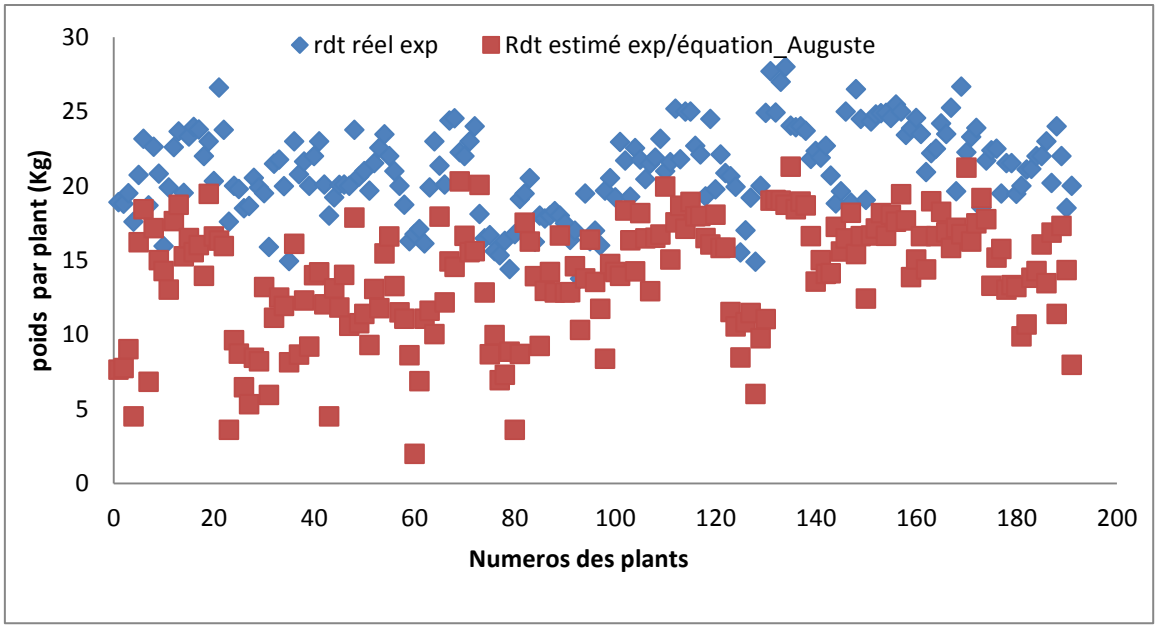


Figure 17 : Comparaison du rendement réel expérimental au rendement estimé par l'équation (3) d'Auguste (2012**)**

II.3. L'EXPÉRIMENTATION SEMI-CONTROLEE EN CHAMP

II.3.1- SITE EXPÉRIMENTAL, PÉDOLOGIE, CLIMAT

L'expérimentation dite « système » a été conduite en champ semi-contrôlé sur le domaine expérimental du centre INRA-Antilles-Guyane de la Guadeloupe (16°12 221'N, 61°39 373' W). Ce site est caractérisé par sa pluviométrie moyenne de l'ordre de 2500 mm par an. Le sol est un ferralsol, soit la même famille des sols de certaines des parcelles échantillonnées au cours du diagnostic agro-écologique en Guadeloupe. La parcelle choisie répond aux recommandations faites par les chercheurs réalisant des travaux sur la culture de bananiers et plantains. En effet, le sol a été assaini par une jachère de cinq ans. Ce qui atteste d'une bonne prophylaxie vis-à-vis des ravageurs telluriques de plantains (notamment de nématodes phytoparasites, voir tableau 8 plus bas) et, une garantie pour la mise en place de cette expérimentation sur les pratiques innovantes dans de bonnes conditions.

II.3.2- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental comporte un ensemble de 8 traitements (ITK1 à ITK8 ; voir tableau 6. 4 pratiques innovantes ont été testées contre 4 pratiques traditionnelles, à savoir : plants assainis « PIF » versus plants non assainis « rejets baïonnettes » ; Vermicompost versus engrais chimique / nématicides ; Plante de service « *P. notatum* » versus herbicides.

Tableau 6 : Description des 8 traitements de l'expérimentation semi-contrôlée

Traitements	Description des itinéraires techniques de l'expérimentation système
ITK1	plants non assainis + herbicides + nématicides/insecticides + engrais chimique
ITK2	plants non assainis + herbicides + vermicompost
ITK3	plants non assainis + nématicides/insecticides + engrais chimique + plante de service
ITK4	plants non assainis + plante de service + vermicompost
ITK5	plants assainis + herbicides + nématicides/insecticides + engrais chimique
ITK6	plants assainis + herbicides + vermicompost
ITK7	plants assainis + nématicides/insecticides + engrais chimique + plante de service
ITK8	plants assainis + plante de service + vermicompost

Ces essais doivent nous permettre de tester l'efficacité de la combinaison d'au moins deux innovations comme la plante de service « *P. notatum* » et la fertilisation organique « vermicompost ». Ce qui devrait permettre le renforcement de l'action suppressive des nématodes phytoparasites et l'augmentation de la productivité du bananier plantain.

Ces traitements vont des pratiques culturales intensives (ITK1) à des pratiques agro-écologiques (ITK8), en passant par les pratiques culturales intermédiaires (ITK2 à ITK7). Notons que, chaque traitement comporte 9 plants baïonnettes ou PIF (numérotés de 1 à 9) plantés distancés de 2 m l'un de l'autre. Tous les traitements ont été répétés trois fois (*A*, *B*, *C*), ce qui a permis de réaliser des analyses statistiques appropriées. Les répétitions de ces traitements (dénommées sous-parcelles) ont été disposées de façon aléatoire et en randomisation par bloc comme le montre la figure 18 ci-dessous.

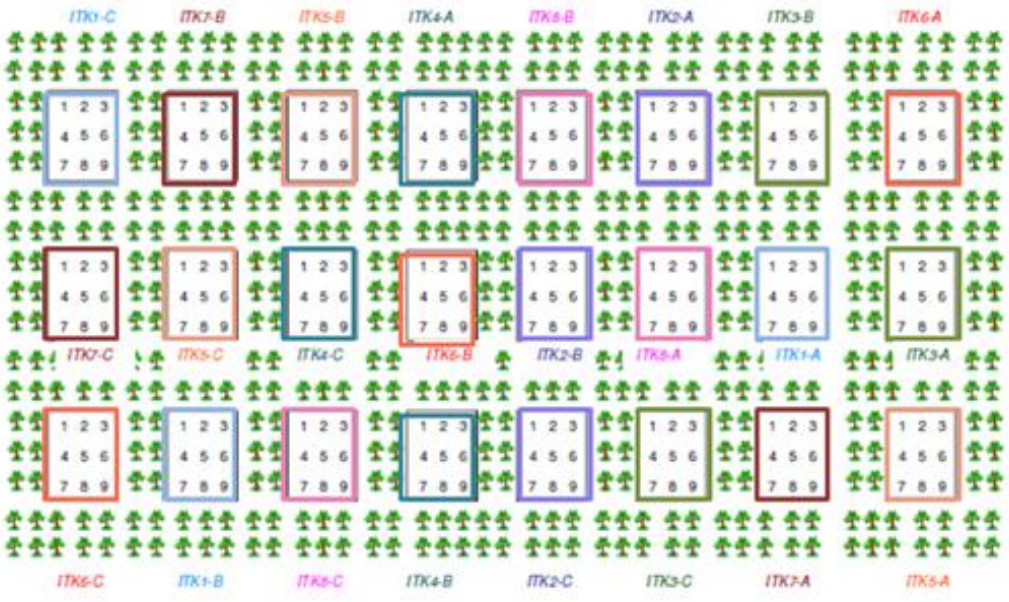


Figure 18 : Dispositif expérimental, distribution aléatoire des traitements en plein champ

Afin d'éviter tout effet traitement, deux rangées de bananiers plantains ont été plantés en inter-rang et en bordure de chaque sous-parcelle. Voyons à présent les modalités de préparations de la parcelle expérimentale et les différentes innovations qui y sont testées.

II.3.3- ÉLABORATION DU PRE-COMPOST ET DU VERMICOMPOST

Figure 19 : les étapes d'élaboration du pré-compost et du vermicompost

II.3.3.1- Pré-compostage

Le pré-compostage est un processus contrôlé au cours duquel les déchets organiques sont dégradés ou décomposés sous l'action des populations microbiennes évoluant en conditions aérobies. Plusieurs couches de déchets verts et d'effluents d'élevage (provenant des sites de Duclos et de Gardel) ont été superposées en sandwich (fig. 19.). Précisons que le suivi de la température est primordial pour la phase de fermentation, qui permet de garantir l'hygiénisation d'un compost. À ce propos, un produit est dit hygiénisé après une semaine à une température supérieure à 60°C pour les systèmes à l'air libre (Ademe, 1998).

Ainsi, tout au long du pré-compostage, la température a été mesurée à l'aide de deux thermocouples placés respectivement à 1/3 et 2/3 du tas (fig.20). Notons que la chute brutale de température, observée vers les 180 jours calendaires sur cette figure, correspond au moment du retournement du tas, où les thermocouples ont été enlevés.

Ce retournement des matières premières a été réalisé à l'aide d'une fourche chaque 15 jours (soit deux retournements sur deux mois) afin d'assurer leur homogénéisation et leur aération ; ce qui favorise non seulement, les activités des micro-organismes aérobies mais aussi, l'élimination, avec la montée de la température, des agents pathogènes et des graines d'adventices. Parallèlement à ce retournement, le tas a été arrosé régulièrement pour éviter son dessèchement (l'humidité doit être entre 50-80% de la masse brute totale, Wilson, 1989 ; Richard *et al.*, 2002) ainsi que la perturbation des activités microbiennes. Ainsi, après ces deux mois, le pré-compost est étalé puis, arrosé et resté à découvert avant de le mettre dans

des bacs destinés au vermicompostage. Ce travail a permis d'accélérer son refroidissement avant l'introduction des vers du fumier ne supportant pas une température élevée.

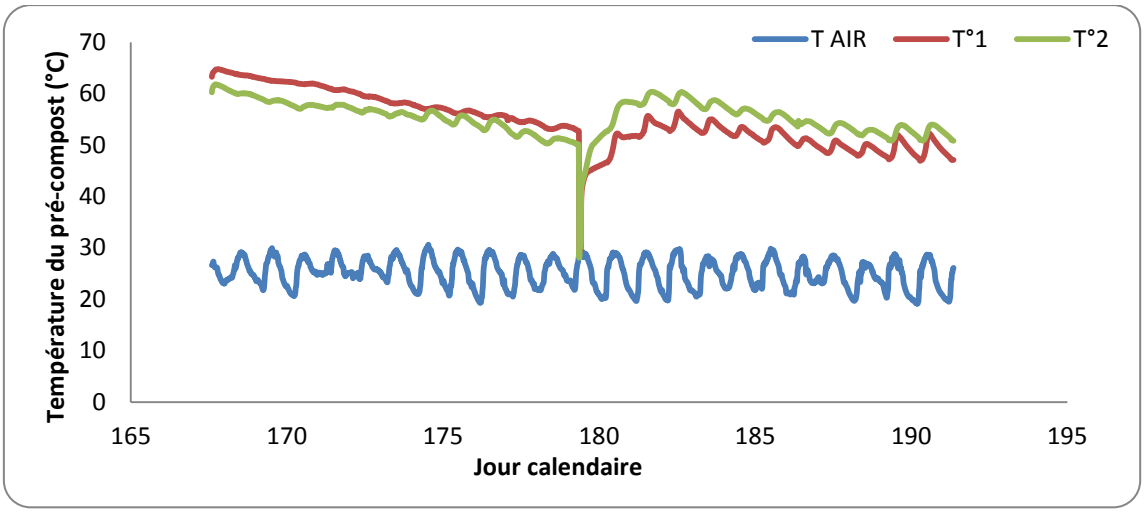


Figure 20 : Évolution de la température dans le tas du pré-compost mesurée par 2 thermocouples (T°1 et T°2)

II.3.3.2- Vermicompostage

Le *vermicompostage*, aussi appelé *lombricompostage*, désigne la transformation des déchets organiques par les vers de terre. Il s'agit d'un processus aérobie naturel et inodore qui est différent du compostage conventionnel. Il conduit, *al fine*, à un produit stable appelé *vermicompost*, constitué de déjections (*turricules*) des vers.

Pour ce faire, deux mois après le pré-compostage, des vers de terre épigés (mélange d'espèces trouvées localement, *Eudrilus eugeniae* et *Perionyx excavatus*) ont été introduits dans le pré-compost, préalablement reparti dans des bacs. Ceux-ci sont recouverts de toile moustiquaire pour empêcher la fuite des vers (*cf.* fig.19). Le contenu de ces bacs a été arrosé régulièrement avec de l'eau de manière à maintenir l'humidité autour de 75% (car les vers fuient les déchets organiques détrempés).

Les vers ingèrent les déchets organiques puis excrètent des turricules (mélange de terre, de matières organiques et de liant produit par les grandes populations des bactéries microscopiques très actives) qui constituent un excellent amendement pour le sol (Brown *et al.*, 2000). Enfin, au bout de deux mois, le « vermicompost » est prêt pour l'application au champ.

II.3.4- PRÉPARATION DU SOL : LABOUR

De prime abord, le sol a été soumis à un déchaumage (travail superficiel du sol 3-8cm de profondeur) à l'aide d'un déchaumeur à disque, ce qui a permis d'enfouir les mauvaises herbes dans le sol. Un mois plus tard, il a fait l'objet d'un labour à l'aide d'une charrue à soc. La dislocation des mottes de terre a été réalisée à l'aide d'un pulvériseur à disque et des sillons ont été délimités à l'aide d'une petite sillonneuse à trois branches. La distance entre les sillons était de 2 mètres. Enfin, la parcelle était subdivisée en seize sous-parcelles au sein desquelles un piquetage (2m*2m) a été réalisé en vue de la mise en place de la plantation.

Il importe de noter qu'après le labour, des prélèvements de sol (T0) ont été faits en 5 points de la parcelle, le long d'un transect, afin de mesurer les propriétés chimiques du sol (tableau 7), l'intensité de la mycorhization (abondance de spores varie de 325 à 642,5 spores/100g sol) ainsi que l'abondance des nématodes du sol (tableau 8).

Tableau 7 : Analyses chimiques du sol à T0 avant la plantation. ES : Erreur Standard.

Éléments	**N (%)**	**C(%)**	**pH_{H2O}**	**pH_{KCl}**
Moyenne (ES)	0,23 (0,008)	2,52(0,087)	5,94 (0,041)	4,98 (0,031)
Éléments	**K(%)**	**Ca(%)**	**Mg(%)**	**P(ppm)**
Moyenne (ES)	0,35 (0,025)	12,86 (0,201)	2,95 (0,036)	85,65 (5,423)

Tableau 8 : abondance de nématodes par 100g de sol à T0 avant la plantation

Nématodes	***Radopholus similis***	***Pratylenchus.* spp**	***Meloidogyne* spp.**	***Rotylenchus* spp.**	***Hélicotylenchus* spp.**	**Nématodes libres**
Densité (100g sol)	0	5	0	0	35,9	11,9

II.3.5- MATÉRIEL VÉGÉTAL

II.3.5.1- Plants Issus des Fragments de tiges de plantain « PIF »

À partir de la fiche technique PIF mise au point par Kwa (2002), nous avons élaboré la nôtre, en l'adaptant à notre région d'étude « Guadeloupe. Par exemple, le substrat initial (sciure de bois blanc : indisponible en Guadeloupe) a été remplacé par des copeaux de bois (réduits à 2mm par broyage) pour ensemencer les bulbes. De même, le substrat du pot dans lequel sont plantés les explants, après le sevrage, est composé de 50% de terreau et 50% de sable de rivière. Pour produire les explants sains « PIF » (fig. 21), nous avons prélevé 80 rejets baïonnettes (à feuilles lancéolées, bulbe renflé) de type « French » chez des agriculteurs. Ces rejets sont parés puis subissent un dégainage de 3 à 5 de leurs gaines foliaires au minimum, ce qui permet de mettre à nu les méristèmes ou bourgeons latéraux. Il en résulte des explants qui sont ensuite traités (nématicide et insecticide), puis mis en germoirs après avoir inhibé leur méristème apical.

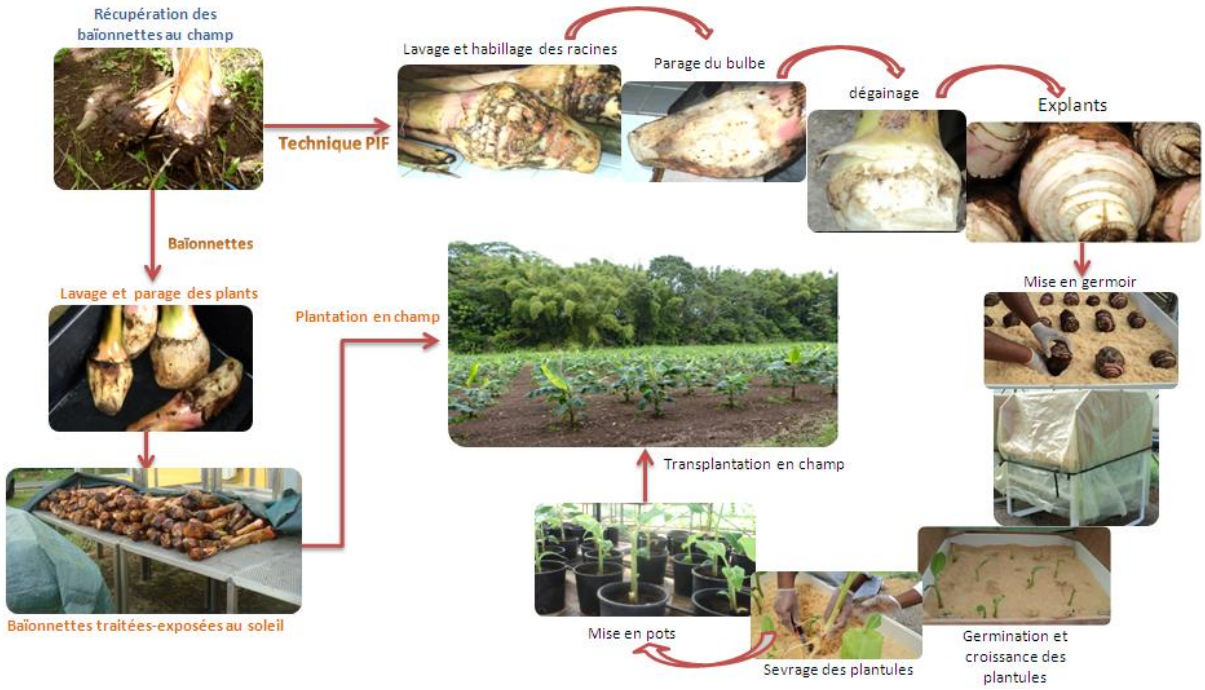


Figure 21 : Résumé des étapes de la technique PIF et préparation des baïonnettes pour la plantation en champ

Ces germoirs contiennent de copeaux de bois blanc (taille 2mm) humide préalablement traitée (fongicide et insecticide) pour éviter toute contamination des explants au cours de leur germination ainsi que leur croissance. Il faut noter que ces germoirs recouverts d'une bâche sont placés sous serre et une ombrière réduisant de 50% les rayons solaires. L'arrosage du contenu des germoirs se fait manuellement deux à trois fois par semaine, de manière à maintenir 70% à 80% d'humidité, condition indispensable pour la germination des explants.

Deux à trois mois après la mise en germoir des explants, les plantules possédant au moins trois feuilles sont sevrées et rempotées, au fur et à mesure, dans des pots contenant un mélange de terreau et de sable de rivière (50 : 50) préalablement stérilisé. Ces pots sont ensuite posés sur des tables placées sous ombrière et une irrigation (goutte à goutte) automatique est installée. À ce stade de la manipulation, afin d'éviter la chlorose foliaire, les plants sont fertilisés à l'aide de mairol (engrais NPK : 14/12/15 en pulvérisation foliaire) puis, d'engrais complet (NPK : 14/10/14 en apport au sol) à l'approche de la transplantation en champ. Ainsi, au bout de trois mois, nous avons obtenu plus de 300 plants sains « PIF » qui ont permis la mise en place de notre expérimentation sur les pratiques innovantes.

II.3.5.2- Plants non assainis « Baïonnettes »

Les plants non assainis selon la méthode PIF, sont également des « baïonnettes », de type « French » prélevés chez des agriculteurs. Comme pour la technique PIF, nous avons

veillé à choisir des rejets de forme conique avec une base bien renflée (*cf.* fig. 21). Ces rejets ont été lavés, parés, puis traités au grésil à 5% (désinfectant bactéricide et fongicide) et entreposés sur des tables. Ils sont ensuite recouverts à l'aide d'une bâche et exposés au soleil pendant deux jours, afin de d'éliminer au maximum les ravageurs telluriques (charançon et nématodes phytoparasites) qui se trouvaient dans leur bulbe.

Concernant la plantation en champ, nous avons procédé à une trouaison manuelle (30×30cm de profondeur) et opté pour une plantation debout pour les « PIF » et à plat pour les baïonnettes. Dans le cas de ces dernières, lorsque le plant est émis par un bourgeon latéral, il est généralement plus fort et plus vigoureux et donc plus résistant aux stress que lorsqu'il est issu d'un bourgeon apical.

II.3.5.3- Plante de service : Paspalum notatum

Paspalum notatum ou Bahia grass est la plante de couverture ou de service (fig. 22) utilisée dans cette expérimentation, en vue de réduire voire d'éliminer l'application d'herbicides dans la gestion des mauvaises herbes. Ainsi, deux mois après la plantation en champ, les graines de *P. notatum* ont été semés dans les sous-parcelles correspondantes (4kg/80m²).

Figure 22 : Plante de service « *P. notatum*»

II.3.6- SUIVI DE L'EXPERIMENTATION

Hormis des mesures qui ont été faites à T0 après le labour, des mesures biométriques sont réalisées tous les mois à partir du quatrième mois de la plantation. Il s'agit de la hauteur des plants et de la circonférence du pseudotronc à 10cm du sol (tenant compte de la taille des plants). Ces mesures sont effectuées sur les 9 bananiers de chaque sous-parcelle jusqu'à 7 mois après la plantation.

Afin d'identifier les conditions climatiques (température, humidité, éclairement) dans lesquelles cette expérimentation-système est réalisée, une station météorologique a été mise en place à proximité de la parcelle (fig. 23). Les différentes interventions faites sur les sous-parcelles sont présentées en annexe V.

Figure 23 : Station météologique

Lors de la floraison du rejet de la bractée des bananiers plantains (soit à partir de 7-8 mois), un diagnostic agro-écologique est également réalisé dans chaque sous-parcelle de manière la plus complète. Ce diagnostic a consisté en l'identification : des propriétés chimiques du sol (analyses sur sol sec et frais), des spores de mycorhizes, des nématodes sol et des racines, de la macrofaune, de la morphologie, des nécroses foliaires et racinaires. Il est complété, à la récolte des régimes, avec la productivité (poids régime) de chaque sous-parcelle et l'estimation des dégâts des larves de charançons au niveau du bulbe de trois plants récoltés par sous-parcelle.

Il est important de noter qu'ici contrairement au diagnostic agro-écologique, réalisé en amont de l'expérimentation-système, qui portait sur cinq bananiers/parcelle, les prélèvements des échantillons ont été effectués sur uniquement le bananier central (N° 5) de chaque sous-parcelle. En effet, cela est du à l'étroitesse des sous-parcelles (16m² environ) (*cf*. fig. 18).

II.4- ANALYSE STATISTIQUE

Le logiciel XLSTAT a été utilisé pour traiter les résultats obtenus lors du diagnostic agro-écologique ainsi que ceux de l'expérimentation-système. Des analyses en composantes principales (Duby & Robin, 2000) ont été réalisées pour les sous-composantes de la fertilité du sol (biologie, chimie, morphologie, parasites). Afin d'identifier l'influence des systèmes de culture sur la qualité du sol et le rendement du plantain, nous avons réalisé une ACP : i) pour chaque sous-composante (biologie, morphologie, chimie et parasites) de la fertilité du sol. Une ACP a été également conduite avec les trois groupes fonctionnels : prédateurs, ingénieurs et transformateurs. Les deux premiers axes qui confèrent le maximum de pouvoir explicatif ont été retenus pour nos interprétations.

Un indicateur chimique, synthétique (IC) a été calculé à l'aide des vecteurs propres (résultant de l'ACP de la sous-composante chimique) des variables contribuant le plus à la construction de l'axe 1.

Des régressions linéaires multiples ont été établies pour choisir le meilleur modèle pour le rendement en mettant en relation : i) les 2 sous composantes du rendement : circonférence et nombre de doigts par régime ; ii) les variables de la fertilité du sol affectant le plus le rendement du plantain (au niveau alpha = 0,05).

Des analyses de variances (ANOVAs) ont été réalisées : i) pour comparer les moyennes des variables par pratiques et précédents culturaux. Des tests non paramétriques ont été réalisés pour tester la significativité (à $P < 0,05$) de ces moyennes entre les systèmes de culture (précédents) et/ou les pratiques culturales. Des modèles mixtes ont été également réalisés, afin d'évaluer les effets aléatoires des pratiques et système de culture sur la fertilité du sol et la productivité du plantain.

PARTIE III : RÉSULTATS

PARTIE III : RÉSULTATS

III.1- ENQUETES AGRO-ENVIRONNEMENTALES EN GUADELOUPE ET EN HAÏTI

❖ Sur les 76 exploitations enquêtées en Guadeloupe, il ressort 7 types de précédents culturaux (figure 24). Parmi ces précédents, 4 ont été sélectionnés pour le diagnostic agro-écologique, en raison de leur représentativité sur la gamme des parcelles échantillonnées et parce qu'elles répondent à nos objectifs. Ce sont : le **précédent-plantain** représentant 36 % des exploitations enquêtées, le **précédent-jachère** (30%), le **précédent-ananas** (7%) et le **précédent-banane pérenne** (6%). Ce dernier type fait référence aux *parcelles cultivées uniquement en banane plantain depuis au moins 3 années consécutives.* Cette durée, plus longue, différencie la banane pérenne des autres parcelles de plantains dont la durée moyenne de plantation n'excède pas 2 ans.

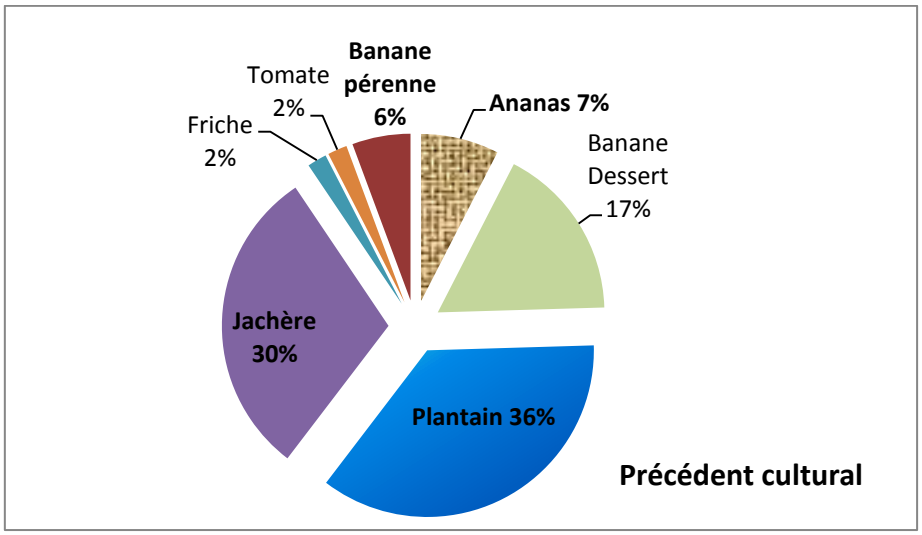


Figure 24 : Répartition des précédents culturaux au sein des systèmes de culture plantains enquêtés en Guadeloupe

Par ailleurs, nous avons tenu compte de la quantité d'intrants herbicides, nématicides/insecticides, fertilisation, apportée au sein des différentes parcelles et du type de précédent cultural. La question à laquelle on cherche à répondre est la suivante : toutes les parcelles qui reçoivent des herbicides, sont aussi celles qui reçoivent des engrais chimiques et ou organiques et qui ont un certain type de précédent cultural ? C'est donc sur la base de cette analyse que nous avons réalisé un classement (à deux niveaux d'intensification) de l'ensemble des parcelles échantillonnées :

i) **Fort niveau d'intrants** : apports d'herbicides (1 l de Basta) plus de 3 fois par cycle, apports de nématicides/insecticides (15g/plant en moyenne) au moins une fois par cycle, apports d'engrais chimiques (100g/plant en moyenne) plus de 5 fois par cycle ;

ii) **Faible niveau d'intrants :** apport d'herbicides (1 l de basta » 2 fois par cycle en moyenne), apports d'engrais chimique (100g/plant : Urée/DAP/NPK) et/ou organique (quantité varie en fonction de la disponibilité) 3 fois par cycle en moyenne.

Ensuite, nous avons utilisé ce classement comme un plan d'expérience pour étudier les effets de différentes techniques sur la fertilité du milieu, et d'autres indicateurs de performances.

❖ Sur une centaine d'exploitations enquêtées dans la plaine de l'Arcahaie (Haïti), nous avons identifié 9 types de précédents culturaux (fig. 25). Parmi ces précédents, 3 types ont été retenus, pour le diagnostic agro-écologique, en raison de leur prédominance dans la plaine. Il s'agit du **précédent-jachère** qui représente 50% des parcelles cultivées, du **précédent-plantain** ou **précédent-banane** (19%) et du **précédent-manioc** (13%).

Hormis ces 3 types de précédents, on retrouve également les précédents : *culture maraichère* (6%), *haricots* (toutes variétés confondues) cultivés purs ou en association avec d'autres cultures (6%), *plantain* associé avec d'autres cultures (2%), maïs cultivé surtout dans les zones sèches non irriguées (2%), et de la *canne-à-sucre*, cultivée pure ou en association (1%).

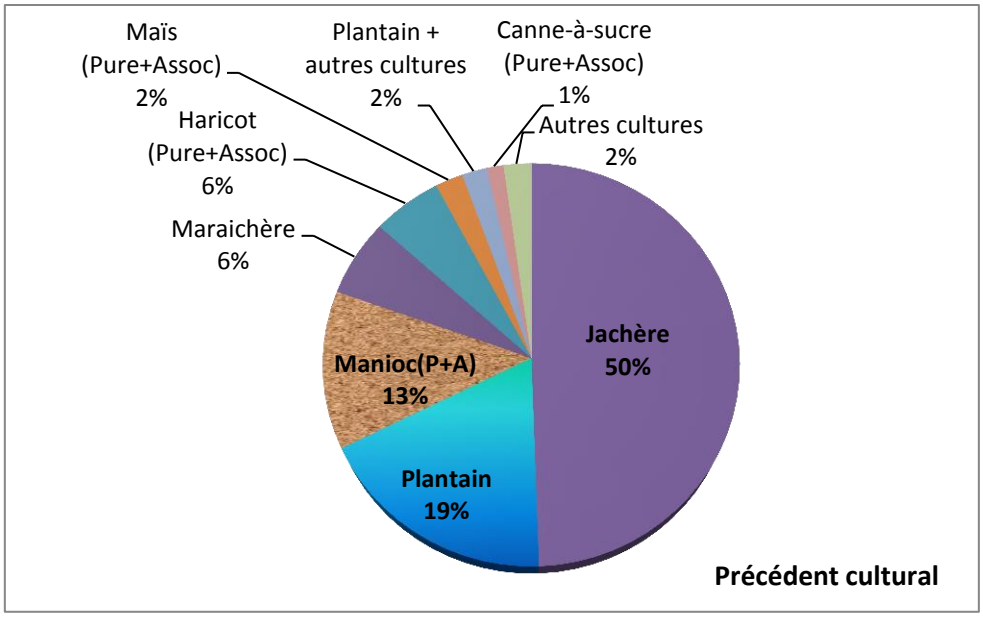


Figure 25 : Répartition des précédents culturaux au sein des **s**ystèmes de cultures plantains enquêtés en Haïti.

En analysant la quantité d'intrants apportée aux parcelles au sein de ces exploitations, nous avons constaté que les agriculteurs en apportaient très peu, voire pas du tout. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi de classer les parcelles sélectionnées, pour le diagnostic agro-écologique, en 2 niveaux d'intensification :

i) **zéro intrant** (aucun apport d'intrants) ;

ii) **faible niveau d'intrants** (apport d'herbicides quasi inexistant, le désherbage étant essentiellement manuel ; apport de nématicides/insecticides « 10g/plant en moyenne » 1 fois à la plantation et, apports d'engrais chimique « 100g/plant en moyenne » 2 fois par cycle).

Le choix du précédent et du niveau d'intrants est fonction de la disponibilité de fonciers et de moyens économiques de l'agriculteur. Quand celui-ci dispose assez de terrain, il peut choisir de mettre une ou plusieurs parcelles en jachère et apporter des engrais aux bananiers plantains. Soulignons que la quantité d'engrais dépend en grande partie de sa disponibilité sur le marché local. Par contre, l'agriculteur qui est privé de moyens fonciers et financiers n'a pas d'autre choix que de cultiver sa parcelle en banane sur banane et sans aucun apport d'intrants.

❖ Suite à l'enquête agri-environnementale, un échantillon de parcelles a été retenu en Guadeloupe et en Haïti pour la réalisation du diagnostic agro-écologique. Signalons que ce dernier a été réalisé de manière complète, en Guadeloupe, comme nous l'avons décrit dans la partie « matériels et méthodes ». Mais, en raison de contraintes d'ordre logistique rencontrées en Haïti, ce diagnostic a été allégé de certaines mesures ou observations, telles que les agrégats du sol, l'abondance de spores, une partie de l'analyse des éléments du sol et de l'observation des dégâts. Afin de simplifier le texte, le « précédent-plantain » est remplacé par « précédent-banane » dans la suite de ce rapport.

III.2- DIAGNOSTIC AGRO-ECOLOGIQUE

III.2.1- EN GUADELOUPE

III.2.1.1- Variabilité des systèmes de culture plantains

Nous avons associé chaque précédent cultural à une catégorie ou un niveau d'intensification (quantité d'intrants apportée à la parcelle en année n), il en ressort 7 variables qualitatives que voici : 1) précédent-Banane/Fort Intrant (Ba-FI), 2) précédent-

Banane/faible intrant (Ba-fi), 3) précédent-Ananas/Fort Intrant (An-FI), 4) précédent-Ananas/faible intrant (An-fi), 5), précédent-Jachère/Fort Intrant (Ja-FI), 6) précédent-Jachère/faible intrant (Ja-fi) et 7) et précédent-Banane pérenne/faible intrant (Bpé-fi). Selon nos analyses il n'existe pas de lien entre le précédent et le niveau d'intrants. Ce dernier semble lié aux habitudes de l'agriculteur. Par exemple, l'agriculteur qui apporte toujours de fortes doses d'intrants à sa culture banane aura toujours tendance à en apporter beaucoup à sa culture de rotation. De même, celui qui pratique la jachère, apportera presque toujours les mêmes quantités d'intrants lors de sa culture de banane, qu'elles soient fortes ou faibles. C'est la raison pour laquelle il est important de faire cette association entre les précédents et les techniques culturales mis en œuvre par les agriculteurs.

Nous avons réalisé l'ensemble de nos analyses statistiques au regard de ces différents couples « précédent/niveau d'intrants », afin de comprendre leurs effets sur les composantes de la fertilité du sol et du rendement.

III.2.1.2- Effets des couples précédents et du niveau d'intensification sur la fertilité du sol

À l'issue des ACPs de chaque sous composante de la fertilité du sol (annexe VI), nous avons sélectionné les variables décrivant le mieux les principaux axes de l'ACP (tableau 9). Le but pour nous ici est d'identifier la significativité (à un niveau de signification alpha = 0,05) des impacts de ces couples « précédents/niveau d'intrants » sur les variables retenues. En analysant les résultats de ce tableau, nous avons constaté d'une part, qu'à **fort niveau d'intrants** :

- le précédent-ananas permet un contrôle plus efficace des populations de charançons que les autres précédents. Ceci se traduit par le plus faible taux de galeries dans les bulbes de bananiers, dus aux larves de charançon noir (tableau 10) ;
- le précédent-banane en revanche, enregistre le plus fort taux de galeries (16%) engendrées par ces larves. Cette différence est significative, comparée au précédent-ananas (1%) ;
- le précédent-jachère favorise la multiplication des nématodes phytoparasites (*R. similis* et *Pratylenchus spp.*) plus que tous les autres précédents culturaux. Par contre, l'abondance de *R. similis* (55 individus/100g sol) est significativement plus élevée dans ces parcelles (tableau 10). Bien que l'abondance de *Pratylenchus spp* y soit plus élevée (175

individus/100g sol), aucune différence significative (P = 0, 05) n'est observée comparée aux autres précédents culturaux.

D'autre part, nous avons constaté qu'à **faible niveau d'intrants** :

- le précédent-banane pérenne maintient une meilleure activité biologique et fertilité chimique des sols (qui se manifeste par l'abondance des agrégats biogéniques). Il génère un plus faible taux de nématodes phytoparasites notamment de *R. similis* (endoparasite), absent dans ces parcelles (tableau 10). En outre, le nématode spiralé, *Helicotylenchus* spp (ectoparasite), y est significativement plus abondant (486,6 individus contre 58,2 en précédent-jachère enregistrant la plus faible densité) ;
- le précédent-banane permet également le maintien d'une bonne fertilité chimique des sols ;
- le précédent-ananas contribue à la plus forte activité biologique du sol, comme le présente le tableau 10. Il comporte une densité significativement plus élevée : de macrofaune totale (651,73 individus/m² contre 153), de spores de mycorhizes (486 spores/100g sol contre 91 en précédent-banane pérenne), d'oligochètes (248,5 individus/m²), et de diplopodes (176 individus/m²). La diversité taxinomique de macrofaune (7,6) y est également plus élevée mais, aucune différence significative n'est observée (P = 0,05) comparée aux autres précédents culturaux (tableau 10). Il comporte le plus faible pourcentage de galeries de charançon noir (tableau 10). Par contre, si l'abondance de *Pratylenchus spp*. reste faible voire nulle dans ces parcelles, celle de *R. similis* y est significativement plus élevée, comparée aux précédents culturaux dont le niveau d'intensification est faible.
- Après l'analyse des agrégats du sol (agrégats biogéniques, agrégats physiques, agrégats racinaires et sol non agrégé), nous avons choisi de présenter les agrégats biogéniques (tableau 10), en raison de leur variabilité par niveau d'intensification et type de précédent.
- Le pourcentage d'agrégats biogéniques observé dans les parcelles bénéficiant d'un faible niveau d'intensification (notamment le précédent-banane pérenne : 46% et le précédent-ananas : 40%), est significativement plus élevé que celui observé dans les parcelles dont le niveau d'intensification est fort.

La macrofaune du sol a été regroupée en trois groupes fonctionnels : ingénieurs, prédateurs et transformateurs de litière. Rappelons que ces groupes jouent un rôle prépondérant dans la régulation biologique des bioagresseurs, sur la fertilité chimique du sol et de façon indirecte sur la croissance du bananier plantain.

Un précédent-jachère associé à un fort niveau d'intrants entraine une diminution importante des ingénieurs et une augmentation des transformateurs de litière (tableau 10).

Cette différence est significative, comparée à un faible niveau d'intrants (quelque soit le précédent).

L'association d'un faible niveau d'intrants à quelque soit le précédent favorise l'activité des ingénieurs de l'écosystème, tandis qu'un fort niveau d'intrants favorise plutôt celle des prédateurs et des transformateurs.

En conclusion, lorsqu'une forte quantité d'intrants (quel que soit le précédent) est apportée à une parcelle, cela entraine une diminution de la sous-composante biologique. Celle-ci se traduit par une faible abondance, notamment, de la diversité taxinomique et donc de la macrofaune totale « y compris les vers de terre et les agrégats biogéniques ». Cette dernière joue un rôle primordial dans le maintien de la qualité du sol.

Les transformateurs de litière, les prédateurs ainsi que les nématodes phytoparasites (notamment *Radopholus similis* et *Pratylenchus spp*) sont plus abondants dans les parcelles cultivées intensivement (précédent-jachère notamment).

Tableau 9 : Les impacts des couples « précédent/niveau d'intrants » sur les variables des 4 sous-composantes de la fertilité du sol

		Les 4 sous-composantes de la fertilité du sol			
		Biologie (F1+ F2 = 31,4%)	**Morphologie (F1+ F2 = 77,7%)**	**Chimie (F1+ F2 = 62,87%)**	**Parasites (F1+ F2 = 42,02%)**
	Précédent	Impact à P<0,05	Impact à P<0,05	Impact à P<0,05	Impact à P<0,05
faible intrant	**Banane**	- Favorise l'abondance des larves de coléoptères, hétéroptères et la diversité taxinomique de la macrofaune	Pas d'impact significatif à P< 5%	- Contribue à un bon statut chimique du sol : **pH_{H2O}, Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}, CEC, N-NO_3 et K^+**	Pas d'impact significatif à P< 5%
	Banane pérenne	- Favorise l'abondance des oligochètes, isopodes, dermaptères et hétéroptères - Limite l'abondance des diplopodes et spores de mycorhizes	- Favorise l'abondance des a**grégats biogéniques** - Limite l'abondance des **a**grégats racinaires et sol non agrégé	- Contribue à un bon statut chimique du sol: **pH_{H2O}, pH_{KCl}, N-NH4, Ca^{++}, Mg^{++}, CEC, P, N_{total} et C_{total}** - Réduit la quantité de K^+	- Favorise les populations de ***Hélicotylenchus* spp.**
	Ananas	- Favorise l'abondance des **oligochètes, diplopodes,** dermaptères, gastéropodes, larves de lépidoptères**, macrofaune totale, diversité de la macrofaune et spores de mycorhizess**	- Favorise l'abondance des agrégats racinaires - Limite l'abondance du sol non agrégé	- Réduit la quantité de : Na^+, Mg^{++}, N et C totaux, K^+	- Favorise les populations de *Meloidogyne* spp. et nématodes libres du sol
	Jachère	- Favorise l'abondance des fourmis et arachnides	Pas d'impact significatif à 5%	- Réduit Mg^{++}, P, N-NO3 et K^+	Pas d'impact significatif à P= 5%
fort intrant	**Banane**	- Favorise l'abondance des : larves de coléoptères, orthoptères - Limite l'abondance des diplopodes, dermaptères et diversité taxinomique de la macrofaune	- Favorise l'abondance des agrégats physiques - Limite l'abondance des **agrégats biogéniques**	- Augmente le N-NH4 - Réduit le statut chimique du sol : pH_{H2O}, pH_{KCl}, Ca^{++}, Mg^{++}, P, N_{total}, C_{total} et K^+	- Favorise les d**égâts de charançons,** - Diminue les populations de *Rotylenchus* spp.
	Ananas	Pas d'impact significatif à P< 5%	- Favorise l'abondance des agrégats racinaires - Limite l'abondance des **Agrégats biogéniques**	Pas d'impact significatif à P< 5%	- Favorise les populations de *Rotylenchus* spp. - Réduit les d**égâts de charançons**
	Jachère	- Favorise l'abondance des d**iplopodes**, chilopodes et isoptères - Limite l'abondance des larves coléoptères	- Favorise l'abondance du sol non agrégé	- Augmente N_{total} et C_{total} ; - Réduit le statut chimique du sol: pH_{H2O}, pH_{KCl}, N-NH4, Ca^{++}, Mg^{++}, P et K^+	- Favorise les populations de ***Radopholus similis***, - Réduit les populations de *Helicotylenchus* spp.

N.B : en gras, les variables retenues (voir tableau 10) en raison de leur forte contribution aux axes et leur importance agro-écologique dans les bananeraies plantains.

Tableau 10 : Impacts du couple précédent/pratiques culturales sur l'abondance des variables représentatives des 4 sous-composantes de la fertilité du sol. Chaque variable est représentée par une moyenne associée à l'erreur standard entre (). En gras les moyennes significativement différentes par niveau d'intensification.

	Pratiques/	Faible niveau d'intrants				Fort niveau d'intrants			ANOVA : Analyse Type III	
	Variables	Banane	Ananas	Jachère	Banane pérenne	Banane	Ananas	Jachère	F (DDL =6)	Pr>F
Biologie	Vers de terre*m^{-2}	45(8) abc	**248** (54) **a**	61(19) abc	**89(18) ab**	**55**(13) ab	31(8) a	28(5) a	13	< 0,00
	Diplopodes*m^{-2}	62(12) ab	**176(**65) **a**	19,20(6,9) abc	14(3) bc	11(3) a	44(14) abc	**91(16) c**	8	< 0,00
	macrofaune totale*m^{-2}	233(44) ab	**652**(144) **a**	298,66(57,7) ab	270(84)ab	153(26) a	159(32) a	**224**(40) ab	5	< 0,00
	Diversité taxinomique	**7(0,7) a**	**7,6**(1,1) a	6,2(1,1) a	5(0,6)a	4(0,4) a	5(0,5) a	**5**(0,4) a	2	0,04
	ingénieurs(%)	48(6)abc	59(9)abc	**78(5)ac**	**70(6)ab**	**53** (6) abc	44(6)ab	**38(4)a**	5	< 0,00
	prédateurs (%)	6(1)ab	2(1)ab	7(2)ab	**3(1)b**	9(2)ab	10(3)ab	**11**(2)b	1	0,15
	transformateurs (%)	46(6)a	38(9)ab	**15(4)b**	**26(5)ab**	**33(6)ab**	46(6)b	**47**(4)b	4	0,00
	Agrégats biogéniques (%)	29(2)abc	**39(5) ab**	**35(2)ab**	**46(3)a**	25(2)ab	**21(2)a**	27(2)ab	15	< 0,00
	Spores de mycorhizes/100g sol	**118(**19) b	**486**(90) a	225(48) ab	**91(**15)b	**133(14) a**	**217**(37) ab	178(17) ab	9	< 0,00
Chimie	pH_{KCl}	**5(0,2)ab**	4(0,1)a	4(0,1)a	**5(0,2)b**	4(0,1)a	**4(0,1)ab**	4(0,1)a	13	< 0,00
	pH_{H2O}	5**(0,2)b**	4(0,2)ab	5(0,1)ab	**6(0,2)b**	4(0,1)a	**5(0,1)b**	5(0,1)ab	13	< 0,00
	Ca^{++}	**7(1,4)b**	1(0,8)a	4(0,2)ab	**9,8(1,4)b**	2(0,2)a	**3**(0,3)ab	2(0,3)a	19	< 0,00
	Mg^{++}	**2(0,1)b**	0,7(0,2)a	1(0,1)a	**2(0,3)b**	1(0,1)a	**1(0,2)ab**	1(0,1)a	12	< 0,00
	Na^{+}	**0,1(0,0)b**	**0,1(0,01)a**	0,1(0,01)a	**0,1(0,01)ab**	0,1(0,0)a	0,1(0,01)a	0,1(0,01)a	6	< 0,00
	CEC	**15(2)ab**	6,61(0,51)a	6(1)a	**18(2)b**	8(0,2)a	**8**(0,7)ab	0,2(0,01)a	12	< 0,00
	$N\text{-}NO_3$	60(21)b	**10(6)ab**	**4(1)a**	41(7)ab	47(7)b	**22(6)ab**	41(7)b	3	0,01
	$N\text{-}NH_4$	13(3)ab	2,5(0,8)a	1,6(0,3)a	**33(13)ab**	**25(6)b**	14(5)a	6,63a	3	0,01
	N_{total}	0,2(0,0)ab	0,1(0,01)a	0,2(0,0)ab	**0,3(0,0)b**	0,2(0,01)a	0,2(0,01)ab	**0,2(0,01)b**	6	< 0,00
	C_{total}	2,23(0,11)ab	1,6(0,10)a	2,4(0,2)ab	**3,2(0,4)b**	2,02(0,09)a	2,1(0,1)a	**2,65(0,13)b**	6	< 0,00
	K^{+}	**1,4(0,2)c**	**0,2(0,1)a**	**0,4(0,1)a**	1(0,2)bc	1(0,1)bc	**0,7(0,1)abc**	**0,6(0,1)ab**	9	< 0,00
	P	292(40)ab	208(59)ab	118(34)a	**1159(212)b**	220(28)ab	**469(78)b**	343(61)ab	12	< 0,00
Parasites	*Pratylenchus spp*	106(50)a	0,0(0,0)a	101(20))a	84(41)a	156(39)a	75(33)a	**174(50)a**	1	0,35
	Radopholus similis	16(8)ab	33(8)b	10(4)ab	0,0(0,0)a	15(5)ab	18(9)ab	**54(17)b**	2	0,03
	Hélicotylenchus spp.	192(64)bc	145(51)abc	**58(21)ab**	**486(110)c**	72(20)ab	56(14)ab	**43,20(14,3)a**	12	< 0,00
	Dégâts charançons	15(2,8)b	11(7)ab	10(2)b	11(2)b	**16(2)b**	**0,7(0,2)a**	11(1)b	8	< 0,00

III.2.1.3- Effets des couples précédents et du niveau d'intrants sur une sous-composante du rendement du bananier plantain

Une ACP a été réalisée avec les variables sur lesquelles les précédents/pratiques culturales ont eu un impact significatif (P<0,05), et une sous composante du rendement du plantain dans les parcelles échantillonnées. Ces variables sont : les 3 groupes fonctionnels de la biologie du sol (ingénieurs, transformateurs et prédateurs), 3 variables des parasites du plantain (*R. similis*, *Pratylenchus spp*. et *Cosmopolites sordidus*) et 1 indicateur synthétique de la chimie du sol (calculé avec les vecteurs propres de l'ACP)

Les résultats de cette analyse montrent qu'à fort niveau d'intrants (excepté avec le précédent-banane) le rendement est significativement plus important qu'à faible niveau d'intrants (fig 26).

Parmi les variables de la composante de la fertilité du sol, seuls les transformateurs de litière semblent contribuer de manière positive à l'augmentation du rendement.

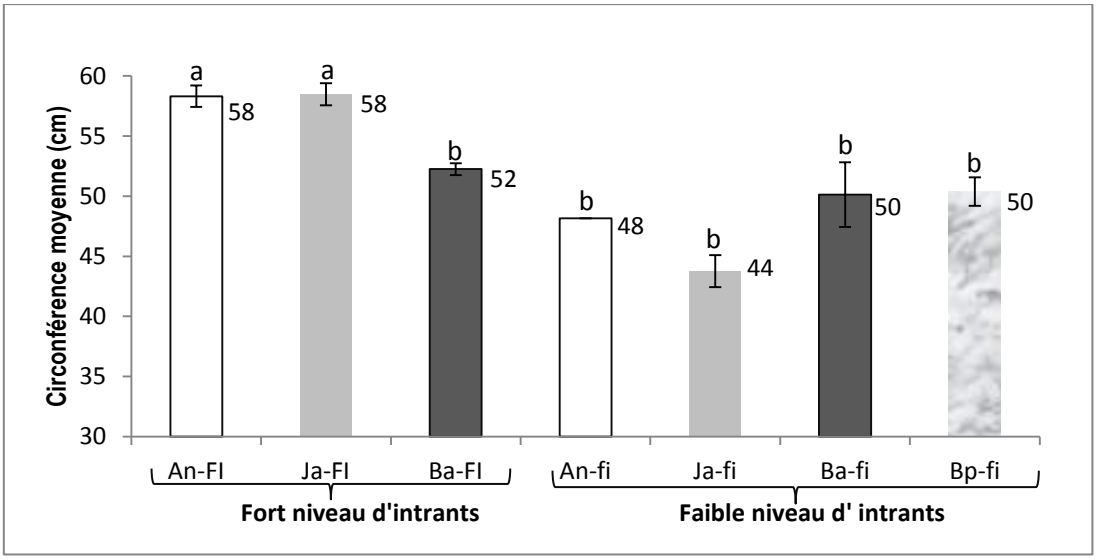


Figure 26 : Impact des couples « précédents / niveau d'intrants » sur la productivité du plantain. Les barres d'erreurs sont les erreurs standards. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les pratiques.

Afin d'identifier les variables de la fertilité du sol qui contribuent à l'élaboration de la productivité du plantain, nous avons réalisé plusieurs régressions linéaires multiples, entre la variable du rendement (circonférence) et les variables de la composante de la fertilité du sol.

Nous avons obtenu 2 équations (5 et 6) dérivées de 2 modèles linéaires : 1) « Stepwise ou Ascendante » (avec R^2 =30,5%, AIC= 401 et SBC = 417) et ; 2) « Descendante » (avec R^2 = 31%, AIC = 406 et BIC= 430) (tableau 11) :

Tableau 11 : Modèles linéaires estimant le rendement par les variables de la fertilité du sol

Modèle 1 : Stepwise/Ascendante	**Circ** = 59,24-0,12*Ing +2,96E-04*IC*Ing+2,99E-04*IC**R. similis*-4,51E-05*IC**Praty. spp*-9,96E-04*IC*% D.Char. **(5)**
Modèle 2 : Descendante	**Circ** = 47,82 + 0,03*IC + 0,09 *Trans – 3,22E-04*IC*Trans – 5,83 E-04*IC*Préd + 2,91 E-04*IC**R. similis*- 3,32 E-05*IC**Praty. Spp* - 9,17E-04*IC*% D.Char + 5,18 E-03*Trans*Préd **(6)**
où IC indique : indicateur chimique, Ing: ingénieurs (%), *R. similis* : densité de *Radopholus similis* dans 100g de sol ; *Praty* : densité de *Pratylenchus spp*. dans 100g sol et D.Char : dégâts charançons, Trans : transformateurs (%)	

Le **modèle 2 « descendant »** a été retenu, en raison des variables qui le constituent et plus particulièrement « les transformateurs de litière » qui semblent contribuer à l'élaboration du rendement. Les nématodes phytoparasites « *R. similis* et *Pratylenchus spp*. » sont plus abondants dans les parcelles dont le rendement est plus important. De plus, nous avons constaté, lorsque les parcelles sont menées de manière intensive, la fertilité chimique du sol diminue. Aussi, les dégâts de charançons peuvent être moindres (cas du précédent-ananas) ou plus importants (cas du précédent-banane).

Notons toutefois, en dépit de son faible R^2 (R^2=30%), le 2ème modèle est en fait, le plus élevé parmi toutes les régressions linéaires multiples obtenues, avec ou sans interactions (niveau 2), entre la variable circonférence et les variables de la composante de la fertilité du sol.

Par ailleurs, lorsqu'on réalise un test de corrélation mettant en jeu le rendement et les variables (retenues dans le modèle) de la fertilité du sol, nous avons constaté que les transformateurs sont fortement corrélés au rendement du plantain (annexe IV), qui est très lié au fort niveau d'intrants.

Lorsqu'on analyse l'interaction entre ces différentes variables de la fertilité du sol, nous avons constaté que la densité de *R. similis* diminue, lorsque la fertilité chimique est meilleure (P= 0,04). Ces résultats confirment l'observation faite dans les parcelles de banane-pérenne (associé à un faible niveau d'intensification). En effet, la fertilité chimique « organique » est meilleure au sein de ces parcelles tandis que, le nématode « *R. similis* », y est absent.

III.2.1.4- Importance du précédent cultural et du niveau d'intensification sur les variables de la fertilité du sol et du rendement

Lorsqu'on réalise des analyses statistiques «ANOVAs » entre les variables sélectionnées de la composante de la fertilité du sol (voir tableau 10 plus haut) et les modes de conduites des agriculteurs, deux grandes tendances se dégagent selon le précédent cultural et

le niveau d'intensification (tableau 12). Ce tableau présente uniquement le(s) précédent(s) et/ou les pratiques culturales (fort intrant versus faible intrant) qui impactent significativement (P<0,05) les variables retenues (positivement ou négativement) pour nos analyses.

Tableau 12 : Présentation des modalités donnant le meilleur résultat des effets (positif ou négatif) des techniques culturales sur les variables de la qualité du sol et du rendement. A : biologie, B : groupes fonctionnels, parasites et rendement, C : chimie du sol.

A	**Vers de terre**		**Diplopodes**		**Mfaune**	**Div-taxinom**		**Spores myc**		**Agrégats biogéniques**	
Pratiques	**fort int**	**Ana**	**Ana**	**Jac**	**fort int**	**fort int**	**Bpé**	**Ana**	**Jac**	**fort int**	**Bpé**
Pente : t	-4,57	2,32	2,80	3,42	-3,13	-3,17	-2,01	5,13	2,81	-3,54	3,58
Pr > |t|	0,0001	0,022	0,006	0,001	0,002	0,002	0,047	0,0001	0,006	0,001	0,001

B	**ing**	**préd**	**trans**	***R. similis***	***Praty***	***Hélico***	**dégâts charançons**		**Rendement**	
Pratiques	fort int	fort int	fort int	Jac	Ana	Bpé	Ana	Ban	faible int	Ban
Pente : t	-4,11	2,88	2,53	2,69	-1,78	8,22	-4,36	3,05	-8,23	-3,39
Pr > |t|	0,0001	0,005	0,013	0,008	0,079	0,0001	0,0001	0,003	0,0001	0,001

C	**pH_{KCl}**	**pH_{H2O}**			**$NH4^+$**		**NO_3^-**	**Na**		**Ca**	
Pratiques	**Bpé**	**fort int**	**Bpé**	**Ana**	**Bpé**	**Jac**	**Ban**	**faible int**	**Ban**	**faible int**	**Bpé**
Pente : t	7,15	-2,15	4,84	2,12	2,01	-2,27	2,61	2,79	2,13	3,27	5,45
Pr > |t|	0,0001	0,034	0,0001	0,036	0,047	0,025	0,010	0,006	0,036	0,001	0,0001

C	**Mg**		**cec**	**N**		**C**		**P**	**K**
Pratiques	Bpé	Jac	Bpé	Bpé	Jac	Bpé	Jac	Bpé	Bpé
Pente : t	4,467	-2,235	6,659	4,874	2,939	5,536	3,683	7,987	3,253
Pr > |t|	0,0001	0,027	0,0001	0,0001	0,004	0,0001	0,000	0,0001	0,002

III.2.1.3.1- Précédent cultural

La culture d'ananas représente le précédent cultural qui contribue le plus au maintien de la biologie du sol (tab. 12 A et 12 B). Le précédent- jachère semble favoriser la multiplication de *R. similis* du sol plus que tous les autres précédents. La culture de banane sur banane contribue au maintien d'un taux plus élevé de charançon noir qui se traduit, vraisemblablement, par le plus faible rendement observé au sein de ces parcelles. La fertilité chimique du sol est meilleure au sein des parcelles de banane-pérenne qui sont menées de manière non intensive et sans labour, depuis au moins 3 ans (tab. 12 C).

III.2.1.3.2- Niveau d'intensification

Lorsque le niveau d'intensification est élevé, la diversité taxinomique ainsi que la macrofaune du sol diminuent (tab. 12 A), comme en témoigne le faible pourcentage d'agrégats observé à fort intrant (tab. 12 B). Lorsque le niveau d'intensification est élevé, l'abondance des ingénieurs diminuent fortement, tandis que celle des transformateurs et des prédateurs a tendance à être augmentée (tab. 12 B). Cependant, lorsque le niveau d'intensification est faible, le rendement du plantain diminue (tableau 12 B), bien que la fertilité du sol soit meilleure dans les parcelles (tab. 12 C).

III.2.2- EN HAÏTI

Nous avons considéré deux catégories d'intrants : zéro intrant et faible intrant, associées à trois types de précédents culturaux. De cette association découle 4 variables qualitatives dont 2 à « *zéro intrant* » (précédent-banane et précédent-manioc) et 2 à « *faible intrant* » (précédent-banane et précédent-jachère).

Analysons l'impact de ces précédents/niveau d'intrants sur les 3 sous-composantes de la fertilité du sol (biologie, chimie et parasites) et d'une composante de rendement (circonférence). Il y a lieu de noter ici qu'une variable a été ajoutée à la sous-composante parasitaire, elle concerne les nécroses foliaires des bananiers plantains. Ces nécroses sont, généralement, dues à la présence de la Cercosporiose noire qui sévit depuis des décennies en Haïti. A cet effet, nous avons choisi de présenter cette variable, en raison de son impact dans l'élaboration de la productivité du plantain.

III.2.2.1- Effets des couples précédents et du niveau d'intensification sur la fertilité du sol

Les principaux résultats des ACPs des 3 sous-composantes de la fertilité du sol (biologie, chimie et parasites ; annexe VII), montrent (tableau 13 ci-après) :

i) qu'en **absence totale d'intrants,** les sols perdent leur fertilité chimique (quelque soit le précédent). Cette perte de fertilité est corollaire d'une faible abondance de macrofaune totale, notamment en vers de terre et en nématodes du sol (*Pratylenchus spp*, nématodes libres). En revanche, les nécroses foliaires y sont plus importantes ;

ii) lorsque des **intrants**, **même en faible quantité, sont apportés**, les parcelles ont une meilleure fertilité chimique. Celle-ci a comme conséquence une plus forte abondance de la

macrofaune, notamment en vers de terre (quelque soit le précédent) et aussi, en nématofaune du sol (quelque soit le précédent).

Par ailleurs, l'analyse de l'impact de ces modes de conduites vis-à-vis des 3 groupes fonctionnels du sol (les ingénieurs sont plus abondants que les prédateurs et les transformateurs) n'y révèle aucun impact significatif (quelque soit le précédent ou le niveau d'intensification ; P< 0,05).

Tableau 13 : Impacts des pratiques sur les variables représentatives de la fertilité du sol. Les variables sont représentées par leur moyenne suivie de leur erreur standard puis, d'une ou de plusieurs lettres. Les lettres différentes sur une même ligne indiquent des différences significatives entre les pratiques. Les valeurs de F et de Pr>F sont indiquées à la fin.

	Pratiques/	**Faible intrant**		**Zéro intrant**		**ANOVA : Analyse Type III**	
	Variables	**Jachère**	**banane**	**banane**	**manioc**	F (DDL =3)	Pr>F
Biologie	vers de terre	**46(11)a**	24(11)ab	5(2)a	1(0,5)a	5	0,01
	macrofaune totale	116(22)a	174(50)a	183(78)a	**13(5)b**	2	0,11
	ingénieurs(%)	**76(6)a**	63(11)a	70(6)a	58(13)a	1	0,41
	prédateurs (%)	7(2)a	**12(10)a**	2(2)a	1(1)a	1	0,28
	transformateurs (%)	**15(5)a**	24(9)a	27(6)a	20(9)a	0,6	0,58
Chimie	Ca++	52(1)b	**63(0,6)a**	47(3)b	**57(2)**ab	6	0,00
	C,E(µ/ms)	**253(26)a**	181(13)a	217(15)a	181(8)a	2	0,02
	N_{total}	0,1(0,0)a	0,1(0,0)a	0,1(0,0)a	0,1(0,0)a	2	0,06
	MO (%)	2(0,1)a	**2(0,1)a**	2(0,2)a	2(0,2)a	0,9	0,44
	K+	0,4(0,0)a	0,3(0,0)a	0,4(0,1)a	**0,3(0,0)a**	2	0,13
	P	**9(0,7)a**	7(0,3)a	8(0,6)a	7(0,6)a	1	0,36
Parasite	*Pratylenchus spp*	12(2)ab	**16(3)**a	9(2)ab	**6(1)b**	2	0,11
	Nématodes libres	9(1)a	9(1)a	10(1)a	**4(1)b**	4	0,01
	Nécroses foliaires	31(2)a	27(1)a	**43(2)b**	**47(7)ab**	7	0,00

III.2.2.2- Effets des couples précédents et du niveau d'intrants sur le rendement du bananier plantain

L'analyse de l'impact des couples « précédent/niveau d'intrants » sur une composante du rendement (circonférence) montre que celui-ci est plus important à faible niveau d'intrants qu'en absence totale d'intrants (fig.27). Toutefois, cette différence est significative uniquement avec le précédent-jachère.

Par ailleurs, nous avons réalisé plusieurs régressions linéaires multiples entre une variable du rendement (circonférence) et certaines variables de la composante de la fertilité du sol. Précisons que ces variables (biologiques : ingénieurs, transformateurs et prédateurs,

parasitaires/nuisibilité : *Pratylenchus spp.*/nécroses foliaires » ; et chimiques : 1 indicateur synthétique) ont subi des impacts significatifs selon le mode de conduites.

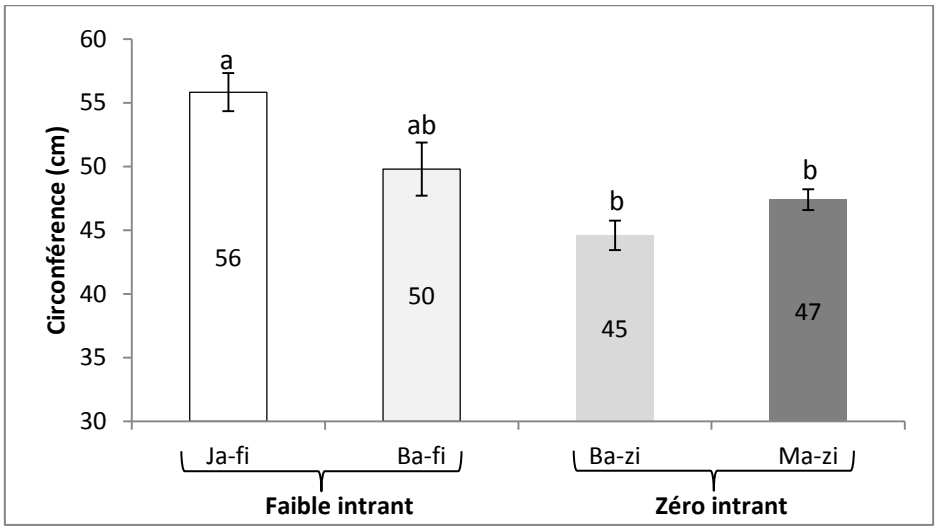


Figure 27 : Effets des couples « précédent/niveau d'intrants » sur le rendement du plantain dans le dispositif Haïti. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les couples à P = 0,05. Les barres sont les erreurs standards.

Le meilleur modèle « régression descendante » obtenu (avec R^2 = 35%, AIC = 224,3 et BIC = 232,7) est donné par l'équation 7 suivante (Praty : abondance de Pratylenchus spp./100g sol, NF : % de Nécroses Foliaires et VDT : abondance en Vers De Terre*m-²):

$$\textbf{Rendement estimé} = 48{,}9 + 0{,}75*\text{Praty} - 2{,}03E^{-02}*\text{Praty}*\text{NF} + 1{,}36E^{-03}*\text{NF}*\text{VDT} \quad (7)$$

Selon ce modèle, le rendement est lié au pourcentage de nécroses foliaires et à l'abondance des oligochètes (vers de terre) dans les parcelles. Un test de corrélation montre que les vers de terre contribuent positivement à l'élaboration du rendement (P=0,006) alors que, les nécroses foliaires y contribuent négativement (P= 0,001).

III.2.2.3-Importance du précédent cultural et du niveau d'intensification sur la fertilité du sol et le rendement

Le précédent-jachère contribue à une augmentation significative de l'abondance des vers de terre ainsi que du rendement du plantain, supérieure aux 2 autres précédents « banane et manioc » (P < 0, 05). L'apport d'un **minimum d'intrants** au sol est très important dans la survie de la biologie et plus particulièrement de la macrofaune (vers de terre par exemple ; P< 0,05). Il est également indispensable dans l'élaboration de la productivité du plantain.

III.3- EXPERIMENTATION SEMI-CONTROLEE

III.3.1- INFLUENCE DES PRATIQUES INNOVANTES SUR LA FERTILITE DU SOL

Les variables de chaque ACP (annexe VIII) contribuant le plus à la construction des deux premiers axes ont été retenues et sont présentées dans le tableau 14 ci-après. La contribution des axes F1 et F2 y est indiquée par sous-composante. L'analyse de ce tableau nous communique les résultats présentés ci-après.

III.3.1.1-Influence du P. notatum

Les activités biologiques du sol sont significativement augmentées en présence du *P. notatum*. Elles se manifestent par la forte abondance des ingénieurs (notamment en vers de terre, essentiellement représentés par l'espèce *Pontoscolex corethrurus*), des transformateurs et de la macrofaune totale du sol ;

L'abondance de *Pratylenchus* spp. dans les racines de plantains est significativement moins importante en présence de *P. notatum* qu'en présence d'herbicides. Celle de *Meloidogyne* spp. est en revanche significativement plus importante.

III.3.1.2- Influence du Vermicompost

L'apport du vermicompost entraine une augmentation de l'activité biologique du sol (notamment en macrofaune totale, vers de terre « *P. corethrurus* » et diversité taxinomique). Mais, cette différence est significative seulement entre les diversités taxinomiques observées dans les traitements dans lesquels la fertilisation se fait à l'aide de l'engrais chimique seul ;

L'abondance de *Meloidogyne* spp. dans les racines du plantain est significativement plus élevée (9713 individus/100g de racines) en présence d'engrais chimique et plus faible en présence du vermicompost (3568 individus/100 g racines).

III.3.1.3- Influence des plants sains « PIF »

Nous avons constaté que le type de matériel végétal utilisé influence non seulement, l'état sanitaire de la plante mais aussi, son rendement (fig. 30). En effet, ces résultats montrent que les plants sains jouissent d'un meilleur état sanitaire que les plants non assainis. Car, les racines de ces derniers comportent une densité de *Pratylenchus spp*. (1083,5 individus /100g de racines) significativement plus élevée ($P<0,05$), comparée à celle retrouvée dans les racines des plants sains « PIF) (1,2 individus/100 g racines).

Par ailleurs, l'état sanitaire des racines des plants semble confirmer ces résultats, en comparant l'indice de nécroses racinaires de ces 2 types de matériel végétal. En effet, l'indice de nécroses racinaires est significativement plus faible (8,7%) dans les racines des plants sains et plus élevé (15,3%) dans les racines des plants non assainis. En revanche, l'abondance du

nématode « *Meloidogyne* spp. » est significativement plus élevée dans les racines des plants sains que celles des plants non assainis.

Les dégâts engendrés par les larves de charançons noirs ont été moins importants dans le bulbe des plants sains. Mais, aucune différence significative n'est observée, par rapport aux plants non assainis, au seuil alpha = 0,05.

Aucune différence significative n'a été observée au niveau des caractériqtiques chimiques du sol au seuil alpha = 0,05.

Tableau 14 : Influence des pratiques innovantes (**PI**) sur la composante «fertilité du sol ». Abondance (moyenne± erreur standard). Les valeurs en gras représentent les moyennes les plus élevées suivies de leur erreur standard. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (Test non Paramétrique : P = 0,05) entre les moyennes (ANOVA) d'un même traitement rangé dans une même colonne.

		PI 1		**PI 2 & 3**			**PI 4**	
	Variables	**Herbicides**	***P. notatum***	**Engrais chimique/nématicides**	**Vermicompost**	**Engrais chimique**	**Santé de la plante**	
							Plants non assainis	**Plants sains**
Biologie (F1 et F2 : 37,6%)	*P. corethrurus**m^{-2}	163(25)a	339(47)b	265(52)a	**291**(44)a	158(69)a		
	macrofaune totale*m^{-2}	198(25)a	**402**(45)b	321(33)a	**345**(50)a	190(67)a		
	Diversité taxinomique	3(0,5)a	**3**(0,5)a	3(0,3)ab	**4**(0,5)b	2(0,7)a		
	Spores de mycorhizes/100g sol	37(6)a	**55**(9)a	47(12)a	45(9)a	46(10)a		
Groupes fonctionnels (axes F1 et F2 : 74%)	ingénieurs(%)	189(25)a	**377**(46)b	304(34)a	**322**(49)a	185(68)a		
	transformateurs (%)	7(2)a	**25**(6)b	15(7)a	**22**(6)a	5(4)a		
	prédateurs (%)	**2**(1)a	0,4(0,4)a	2(2)a	2(1)a	0(0)a		
Morphologie (F1 et F2 : 79%)	Agrégats biogéniques (%)	37 (3)	40(3)	34(2)	38(3)	45(6)		
Chimie (F1 et F2 : 61%)	pH_{KCl}	5 (0,1)	5(0,1)	5(0,1)	5(0,0)	5(0,1)		
	pH_{H2O}	4(0,0)	4(0,0)	4(0,1)	4(0,0)	4(0,1)		
	Ca^{++}	13(0,3)	13(0,3)	13(0,5)	13(0,3)	13(0,6)		
	Na^{+}	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)		
	CEC	16(0,2)	16(0,2)	16(0,3)	16(0,2)	16(0,3)		
	$N\text{-}NH_4$	11(1,5)	11(0,8)	9(1,2)	11(0,7)	14(2,6)		
	N_{total}	0,1(0,0)	0,2(0,0)	0,1(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)		
	C_{total}	1,7(0,0)	1,7(0,0)	1,6(0,1)	1,7(0,0)	1,6(0,3)		
	K^{+}	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,0)	0,2(0,04)		
Parasites (axes F1 et F2 :52%)	*Pratylenchus spp.*	**706(**473)b	378(231)a	342(342)a	**912**(477)a	2(2)a	**1083**(478)b	1(1)a
	Méloidogyne spp.	4788(1045)a	**5957(**1153)b	4639(956)ab	3568(703)a	**9713**(1634)b	3721(631)a	**4369**(1261)b
	Indice de nécroses racinaires	11(2)a	12(2)a	14(4)a	13(2,5)a	7(0,7)a	**15**(2)b	8(1)a
	Dégâts charançons	**3**(0,5)a	2(0,5)a	3(1)a	2,9(0,4)a	2(0,7)a	**3**(0,6)a	2,5(0,5)a

III.3.2- INFLUENCE DES PRATIQUES INNOVANTES SUR LA COMPOSANTE « RENDEMENT » DU PLANTAIN

➢ *Influence du P. notatum (PN) sur la composante du rendement*

Les 3 sous-composantes du rendement (circonférence du pseudotronc à 1m du sol, nombre de doigts par régime et poids du régime) sont légèrement plus importantes en présence du *P. notatum* qu'en présence d'herbicides. Cependant, aucune différence significative n'est décelée au seuil alpha = 0,05.

➢ *Influence du type de fertilisant et apports de nématicides/insecticides sur la composante du rendement*

Le rendement (notamment la circonférence et le poids du régime) est plus important lorsqu'on apporte de l'engrais chimique seul (51 cm et 19.6 kg) que lorsqu'on apporte du vermicompost (49 cm et 16.2 kg) (fig. 29).

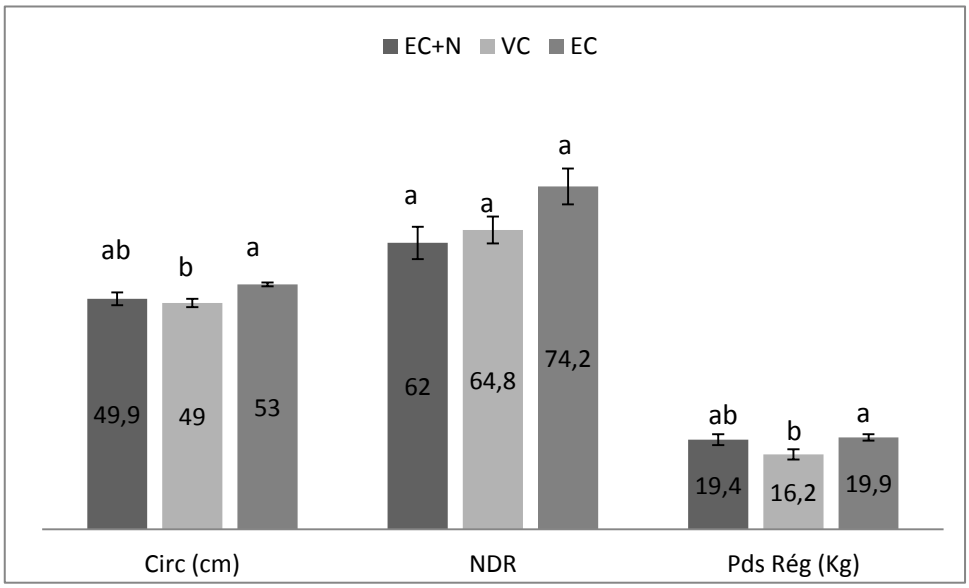


Figure 28 : Influence du type de fertilisation (EC : engrais chimique ou organique : VC : vermicompost) et des apports de nématicides (EC+N) sur les trois sous composantes du rendement. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les triplets à P = 0,05. Les barres sont les erreurs standards**.** Circ : Circonférence, NDR : Nombre de Doigts/Régime, Pds Rég : Poids moyen des Régimes.

➢ *Influence de l'assainissement des plants sur la composante du rendement*

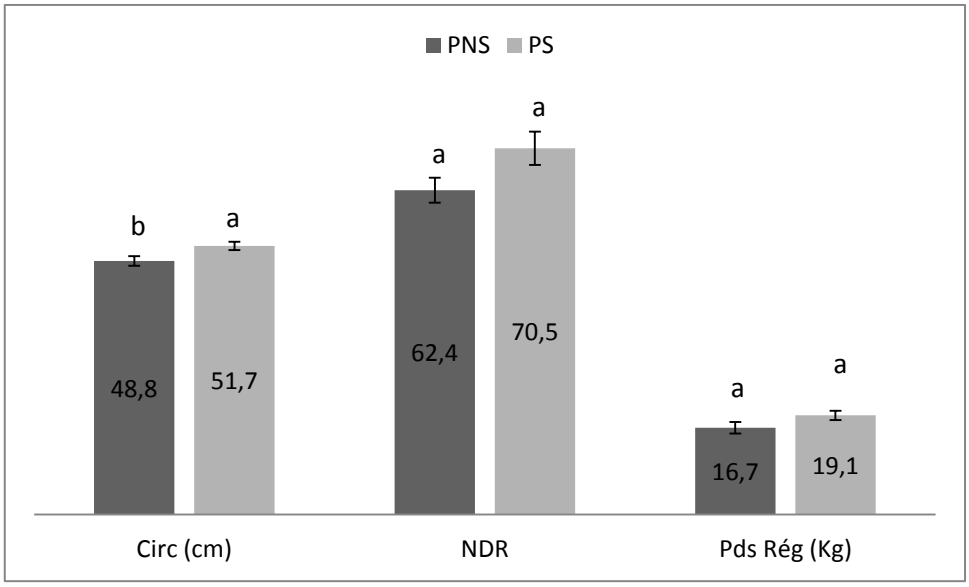


Figure 29 : Influence de l'assainissement des planst sains (PS) et des plants non sains (PNS) sur les trois sous composantes du rendement. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les couples à P = 0,05. Les barres sont les erreurs standards. Circ : Circonférence, NDR : Nombre de Doigts/Régime, Pds Rég : Poids moyen des Régimes.

Les plants assainis (PS) semblent élaborer un meilleur rendement mais, seule leur circonférence présente une différence significative (P<0,05), comparée à celle des plants non assainis (PNS) (fig. 30). Tenant compte des résultats obtenus sur l'état sanitaire des plants, les nécroses racinaires générées par l'abondance de *Pratylenchus spp*. (dans les racines des plants non assainis « PNS ») impactent négativement le rendement du plantain (P= 0,002).

En résumé, les pratiques innovantes représentées par : *P. notatum*, vermicompost et les plants sains « PIF », contribuent au maintien d'une bonne qualité du sol et d'un bon état sanitaire de la plante. Tandis que, les pratiques +/- intensives conventionnelles (nématicides, herbicides et engrais chimique), bien qu'elles permettent d'augmenter le rendement, impactent néanmoins négativement la qualité du sol.

III.3.3- INFLUENCE DU NIVEAU D'INTENSIFICATION SUR LA FERTILITE ET LA PRODUCTIVITE DU PLANTAIN

Nous avons classé les 8 traitements étudiés, au cours de cette expérimentation comparant les pratiques conventionnelles aux pratiques agroécologiques innovantes, en 4 niveaux d'intensification. Ceux-ci vont de la pratique intensive (engrais chimique et nématicides/plants non assainis/herbicides), moyenne intensive (engrais chimique+ +nématicides/*P. notatum*/plants non assainis et engrais chimique/herbicides/plants sains), faible intensive (vermicompost/herbicides/plants sains ou non assainis et engrais chimique/*P.*

notatum/plants sains) à agroécologique (vermicompost/plants sains ou non assainis/*P. notatum*).

L'analyse des résultats (tableau 15) montre, en général, que les pratiques agroécologiques favorisent une meilleure fertilité du sol (comme par exemple, l'abondance en vers de terre) et un meilleur contrôle des nématodes « *Pratylenchus spp*. et *Meloidogyne* spp. ». Par contre, lorsque le niveau d'intensification est élevé, l'état sanitaire de la plante est mauvais. On note toutefois, un rendement plus important lorsque le niveau d'intensification est +/- élevé. Mais, comparée à la pratique agroécologique, cette différence est non significative (P<0,05).

Tableau 15 : Influence du niveau d'intensification sur la fertilité du sol et le rendement. Les moyennes sont suivies des erreurs standars ()

		Pratiques			
	Variables	**Très intense**	**Moy intense**	**Faib intense**	**Agroécologie**
Biologie	P. corethrurus*m^{-2}	199(69)	212(61)	194(46)	402(52)
Parasites	*R. similis*100g^{-1} racines*	968(961)	360(352)	142(142)	899(667)
	Pratylenchus spp**100g^{-1} racines*	0(0)	344(341)	941(618)	414 (342)
	Meloidogyne spp**100g^{-1} racines*	3955(980)	6678(1514)	6187(1681)	3555(516)
	INR (%)	14(7)	10(2)	10(2,1)	15(4)
	Dégât Char.(%)	4(1)	3(0,6)	2(0,8)	2(0,3)
Rendement	Circonférence (cm)	50(2)	51(1)	50(1)	49(1)
	Poids régime (Kg)	21(1)	18(1)	18(1)	15(1)
	Nombre de doigts/régime	61(7)	69(4)	68(3)	63(4)

PARTIE IV : DISCUSSION

PARTIE IV : DISCUSSION

IV.1- LES ENSEIGNEMENTS DU DIAGNOSTIC AGRO-ÉCOLOGIQUE RÉALISÉ EN GUADELOUPE ET EN HAÏTI

Les problèmes que rencontre la production de plantain dans les deux régions de notre étude, notamment un niveau de parasitisme tellurique élevé, ont conduit les agriculteurs à faire des choix de systèmes de culture et de pratiques culturales qui visent à le réduire sans pour autant restaurer les conditions de durabilité des plantations, dont les cycles se limitent à un ou deux ans. L'objectif essentiel auquel tendent la plupart des planteurs, est d'optimiser le rendement du plantain, souvent au détriment de la préservation des régulations naturelles et du bon fonctionnement des cycles trophiques. Nous avons choisi de développer une approche dite de « diagnostic agro-écologique » permettant d'évaluer l'état des composantes biologiques (macrofaune, mycorhizes, agrégats biogéniques) et chimiques (éléments nutritifs indispensables à la plante) en lien avec l'état sanitaire de la plante (% nécroses racinaires, bulbaires et foliaires) et la productivité du plantain.

Les résultats de ce diagnostic agro-écologique permettent de répondre aux interrogations abordées au début de cette thèse, à savoir, quels sont les systèmes de culture et/ou les pratiques culturales qui concourent au maintien d'une meilleure qualité du sol, en préservant les équilibres biologiques et le potentiel de biorégulation dans les bananeraies plantains, tout en renforçant leurs performances productives et leur durabilité ?

Dans ce chapitre, nous développerons notre analyse des résultats selon trois angles : i) les effets des systèmes de cultures et des pratiques culturales sur la composante « fertilité du sol » (biologie et chimie) ; ii) les effets de ces pratiques sur le parasitisme tellurique et les maladies aériennes au regard de la santé de la plante ; iii) les effets des pratiques sur la productivité du plantain.

IV.1.1- EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE ET PRATIQUES CULTURALES SUR LA FERTILITE DU SOL

Nos résultats montrent des effets négatifs de fortes doses d'intrants (nématicides/insecticides, engrais chimiques, herbicides) sur l'abondance de la macrofaune totale et de la diversité taxinomique dans les parcelles de plantains (quel que soit le précédent). Lorsque ces pratiques culturales sont peu intensives, l'activité biologique des sols se révèle meilleure (quel que soit le précédent). Précisons, toutefois, que certains précédents culturaux comme le précédent ananas, semblent favoriser plus fortement l'activité biologique des sols. Ce résultat corrobore les travaux de plusieurs chercheurs qui suggèrent que les

pratiques culturales intensives (travail du sol, intrants de synthèse) entraînent la réduction ou voire la disparition des macro-invertébrés du sol et, notamment des ingénieurs de l'écosystème (Lavelle *et al.*, 1997 ; Ponge, 2000 ; Lavelle, 2002 ; Lamandé *et al*., 2004). En effet, ces ingénieurs régulant la plupart des grands processus du sol, sont sensibles et peu persistants au travail intensif et aux intrants chimiques (Lavelle, 2002). Parmi ces ingénieurs, les communautés des vers de terre sont les plus affectées par les pratiques culturales intensives (Lamandé *et al*., 2004). C'est probablement l'une des principales raisons qui fait que les vers de terre sont souvent considérés comme étant de bons indicateurs permettant de suivre l'évolution de la qualité du sol (Paoletti, 1999).

Il faut noter que ces pratiques culturales intensives, en diminuant l'abondance des ingénieurs du sol, entraînent un véritable déséquilibre biologique qui se traduit, dans notre cas, par une augmentation de prédateurs et de transformateurs de litière. L'augmentation de ces deux groupes pourrait être liée, également, à la présence d'une communauté importante de mauvaises herbes au cours des jachères (Wardle *et al*., 1995). Quand aux transformateurs, leur abondance est sûrement due à la présence d'une forte quantité de résidus à décomposer. Aussi, les nutriments appliqués aux sols peuvent leur permettre de décomposer la matière organique sans limitation nutritionnelle.

Mentionnons en outre que cette diminution d'ingénieurs et plus précisément celle des vers de terre est corrélée à la faible abondance d'agrégats biogéniques observée dans les sols recevant de fortes doses d'intrants (quel que soit le précédent). En effet, tenant compte du rôle crucial joué par les ingénieurs dans la structuration du sol, la diminution de leur activité dans les sols entraînerait une perturbation de l'état structural du sol (Cluzeau *et al*., 1987, 1990). Cette diminution d'activité biologique confirme la forte abondance de sol non agrégé observée dans les sols des parcelles travaillées intensivement.

L'abondance d'agrégats biogéniques observée dans les parcelles de banane pérenne ou ayant un précédant ananas est probablement liée à la forte activité biologique des ingénieurs du sol (vers de terre notamment). L'activité des vers de terre est généralement reconnue pour augmenter la taille (Decaëns, 2001) et le nombre d'agrégats biomacrostructurés du sol (Brown *et al*., 2000). La présence de ces structures biogéniques indique non seulement, une meilleure stabilité du sol mais aussi, une augmentation de la qualité des biorégulations telluriques dans ces parcelles (Chagüeza, 2011). Dans le cas de la banane pérenne, l'abondance de ces structures peut être expliquée aussi, par :

i) les apports de matière organique qui contribuent à renforcer l'activité des ingénieurs du sol. Fraser *et al*. (1996) ont montré que les populations des vers de terre répondent très

rapidement aux changements dans la disponibilité du carbone apporté par les différentes pratiques de gestion du sol. On peut penser que ces ingénieurs utilisent une partie de l'énergie contenue dans la matière organique ingérée pour construire des agrégats organo-minéraux stables (Marinisissen & Dexter, 1990 ; Hindell *et al*., 1997).

ii) la réduction du travail du sol qui se traduit en quelques années par une amélioration de la stabilité de la structure du sol (Haynes *et al.,* 1991 ; Carter, 1992 ; Beare et al.,1994 ; Altieri, 1999 ; Haynes, 1999 ; Haynes, 2000). Celle-ci peut se renforcer par le maintien d'une litière permanente de résidus végétaux à la surface du sol. Il en résulte des pratiques plus favorables à l'activité biologique (Carter, 1991 ; Angers *et al*., 1993) et particulièrement à la diversification des invertébrés du sol (Altieri, 1999). Dorel *et al*. (2005) ont montré que les travaux du sol effectués lors des replantations dans les bananeraies mécanisées sont extrêmement défavorables à l'activité des ingénieurs du sol. D'autres travaux réalisés sur les andosols de Guadeloupe ont montré qu'un labour profond provoquait une diminution de la teneur en matière organique du sol (Dorel, 1993 ; Clermont-Dauphin *et al*., 2004). C'est probablement ce qui explique la faible teneur en matière organique observée dans les parcelles labourées régulièrement.

Les pratiques culturales moins intensives sont favorables au développement des champignons mycorhiziens. Selon nos résultats**,** l'ananas et la jachère ont un effet positif sur le développement de la mycoflore. Black & Tinker (1979) affirment que l'importance des mycorhizes dans les écosystèmes naturels varie en fonction de leurs propriétés pédologiques, des pratiques culturales, des saisons et de l'activité des autres organismes. Dans les sols acides, on trouve plus de champignons (Alvarez *et al*., 2002). Le faible pH mesuré dans les sols des parcelles précédées d'ananas pourrait sans doute expliquer cette forte abondance de spores de mycorhizes qu'on y observe. Selon les travaux d'autres auteurs, nos résultats pourraient s'expliquer par la forte capacité d'endomycorrhization de l'ananas (Guillemin *et al*., 1992). On peut imaginer, qu'il y a eu une forte colonisation des racines d'ananas par les mycorhizes, qui se traduit par l'abondance des spores observée dans ces parcelles (quelque soit le niveau d'intrants). D'autre part, les mycorhizes se développent plus dans les sols pauvres en nutriments minéraux, notamment en phosphore (Fortin *et al*., 2008 ; Rodriguez-Romero *et al*., 2011). Ces derniers auteurs affirment que l'effet positif de l'ananas sur la mycorhization est plus important lorsque le niveau de phosphore est faible.

Nos résultats sont en accord avec les conclusions de ces chercheurs. Nous avons constaté une corrélation négative entre le nombre de spores et la teneur en phosphore. Dans les parcelles ayant pour précédent l'ananas, la plus forte densité de spores est corrélée à la

plus faible teneur en phosphore. Dans les parcelles précédées d'une jachère, bien que la densité de spores soit moins importante que celle observée dans les parcelles précédées d'ananas, on observe la même tendance. Fortin *et al*. (2008) soulignent que : i) la jachère constitue un véritable réservoir de champignons mycorhiziens, puisqu'elle maintient le potentiel mycorhizogène du sol qui se régénère dès la première année et diminue ensuite sous l'action de pâturage ; ii) l'accumulation du phosphore d'origine minérale et organique apportée aux sols diminue la multiplication des mycorhizes et le potentiel mycorhizogène. Cette dernière conclusion expliquerait la plus faible densité de spores dénombrée dans les parcelles de banane pérenne où la plus forte teneur en phosphore a été mesurée (tout précédent et niveau d'intrants confondus).

Les sols haïtiens étant carencés en phosphore, les mycorhizes (non identifiées lors de notre étude) devraient être, sans doute, relativement abondantes. La faible teneur en phosphore mesurée dans les parcelles (toutes confondues), peut être expliquée par le fait que de nombreux agriculteurs haïtiens n'apportent aucun engrais chimique à leurs parcelles, en raison de leurs faibles moyens économiques ou à la non-disponibilité de celui-ci.

En Haïti, nos résultats montrent une forte diminution de la qualité du sol avec l'absence de fertilisation. Celle-ci se traduit par la faible abondance de macrofaune et aussi par une fertilité chimique du sol réduite. Il faut noter que dans notre travail, l'échantillonnage a été réalisé en période de sécheresse (août 2012) où l'irrigation dans ces parcelles était insuffisante et irrégulière. De plus, le fort niveau de pierrosité et le fort pourcentage de sol nu (100%) observés lors de l'échantillonnage peuvent expliquer la faible activité biologique et la fertilité chimique réduite du sol. Dans ces conditions, l'absence de fertilisation pourrait renforcer la baisse de la qualité des sols. En fait, l'épuisement minéral de ces sols résulterait des modes de conduites culturales qu'on y applique. On peut penser qu'au fil du temps, horsmis l'érosion de ces sols qui entrainent la perte d'une partie des éléments nutritifs, les plantes cultivées (seules ou associées à d'autres plantes), pour se développer, finissent par appauvrir les sols. Ce qui conduirait à une réduction drastique des organismes dans les sols de ces parcelles. Face à ce constat, il est important d'apporter un minimum de fertilisants (organique par exemple) au sol, quel que soit la culture, afin de maintenir sa fertilité et la survie des organismes qui y habitent. Fu *et al*. (2000), dans une étude au champ, indiquent une quasi-absence d'activité biologique dans le sol labouré, sans restitution de récolte et sans fertilisation après 10 ans de rotation riz/soja. Le même résultat a été obtenu par Villenave *et al*. (2012) dans une étude, réalisée à Madagascar, sur l'analyse de la nématofaune du sol.

En conclusion, les systèmes de culture à faible niveau d'intensification favorisent le maintien de la fertilité biologique et chimique du sol ; celle-ci se renforce par un travail réduit du sol. Les systèmes de culture à fort niveau d'intensification permettent une augmentation du rendement sur une durée limitée (1 à 2 cycles), en raison des effets négatifs sur la qualité du sol. L'absence totale des apports de fertilisants dans les sols de bananeraies n'est pas une bonne pratique culturale car, elle entraine la perte de fertilité biologique et chimique du sol en pénalisant le rendement du plantain. Le choix du précédent cultural, même s'il est intéressant d'un point de vue prophylaxique, peut être contre-indiqué du point de vue du maintien de la fertilité chimique, s'il n'est pas compensé par un apport de fertilisants. Ainsi, la culture de manioc semble être un bon précédent cultural permettant un bon assainissement parasitaire du sol, tout en appauvrissant chimiquement le sol.

IV.1.2- EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES PRATIQUES CULTURALES SUR L'ETAT SANITAIRE DE LA PLANTE

Lorsque le niveau d'intensification est élevé, on observe une plus forte abondance de *R. similis* et de *Pratylenchus* spp., en particulier dans les parcelles précédées d'une jachère. Ces pratiques, au lieu de réduire les populations de ces deux nématodes, favorisent au contraire leur prolifération. Ces résultats corroborent les travaux de Wade & David (1998) dans une étude réalisée à Cuba. Ces auteurs ont montré, que *R. similis* et *Pratylenchus spp*. ont été retrouvés dans les parcelles de plantain, après une jachère de 28 mois à cause des souches et rejets infestés laissés sur la parcelle.

D'autre part, Settle *et al*., (1996) ont montré que l'application systématique des pesticides dans les champs de riz augmentait la nuisibilité des parasites de la plante, une fois éliminés leurs ennemis naturels. Pour Lavelle *et al*. (2006) l'utilisation récurrente de pesticides qui ne sont plus suffisamment actifs lorsque les ravageurs commençent à apparaitre, est inutile.

Dans notre étude, la forte dominance de ces deux nématodes les plus nuisibles pour la banane est probablement due :

i) aux fortes doses d'intrants apportées à ces parcelles qui peuvent affecter la régulation biologique naturelle des bioagresseurs telluriques (Lavelle *et al*., 2006) ;

ii) à la durée des jachères ou au fait que les jachères ne soient pas assainissantes ;

iii) au fait que des souches et rejets de bananes infestés, laissés sur les parcelles, ont favorisé la survie de ces nématodes pendant la jachère.

De fait, la suppression des nématodes, dépend des espèces végétales (hôtes ou non-hôtes de nématodes) présentes sur la parcelle en jachère, de la durée des jachères et des pratiques culturales (Rapport Plan Banane Durable, 2010).

L'effet assainissant des jachères aurait été également annihilé par l'introduction des plants baïonnettes déjà infestés et non correctement assainis. Ce type de plant constitue le principal matériel végétal de replantation utilisé par les agriculteurs dans les 2 régions de notre étude (provenant de parcelles déjà contaminées). Mis à part des parcelles précédées d'une jachère, la forte densité de *Pratylenchus* spp. observée dans les parcelles précédées de la banane s'explique, probablement, par l'absence de vide sanitaire en fin de culture du plantain.

La corrélation négative observée entre ces deux principaux nématodes phytoparasites pourrait s'expliquer par un effet compétitif entre eux. Les populations de *Pratylenchus* spp. sont favorisées au détriment de celles de *R. similis*. Selon Kone *et al*. (2010), lorsque *R. similis et P. coffeae* sont inoculés sur un même bananier (Musa AAA, cultivar Williams), la reproduction du *R. similis* est inhibée par le *P. coffeae*. Toutefois, l'inoculation concomitante de ces deux espèces de nématodes phytoparasites a eu une nuisibilité, moins importante que celle générée par la somme des actions individuelles.

Cette virulence de *P. coffeae* a été également démontrée par les travaux de Gnonhouri & Adiko (2005). Ces auteurs affirment que, dans les zones de production de la banane (*Musa* AAA) où *P. coffeae* était prédominant, la durée des bananeraies était plus courte (1 à 5 ans). Ces résultats prouvent que *Pratylenchus* spp. est plus virulent vis-à-vis du plantain que *R. similis.* En réalité, il apparait que les pratiques culturales intensives auraient stimulé la multiplication de *Pratylenchus* spp. plus que celle de *R. similis*. Cette virulence avérée, peut expliquer les raisons pour lesquelles, les agriculteurs sont amenés, après 1 à 2 cycles de production : i) à replanter leur parcelle en banane ou, ii) la laisser en jachère ou encore, iii) à opter pour une rotation culturale (ananas et manioc notamment).

L'absence totale de *R. similis* dans les parcelles de plantains d'Haïti est sûrement due au fait que celui-ci est une espèce exotique de la zone Caraïbe (Quénéhervé & Van den Berg, 2005). Selon ces auteurs, cette espèce (originaire d'Asie du sud-est) aurait été introduite accidentellement avec des importations de marchandises, dans pratiquement toutes les régions de culture du bananier dès le début du 15ème siècle.

D'autres auteurs suggèrent que, dans les jachères de l'Afrique de l'Ouest, la compétition interspécifique entre les diverses populations de nématodes phytoparasites semblent maintenir les espèces les plus nuisibles à une densité permettant aux plantes de les tolérer (Lavelle *et al*., 1997 ; Cadet *et al*., 2004 ; Cadet *et al*., 2005).

La faible densité de *R. similis* et de *Pratylenchus spp* dans les sols des parcelles ayant pour précédent la culture d'ananas (quelque soit le niveau d'intensification) s'expliquerait par le fait que celle-ci soit non-hôte ou faiblement hôte de ces nématodes. Auguste (2012) a obtenu le même résultat, en analysant les racines des bananiers plantains provenant de ces mêmes parcelles, en fonction des précédents. Tenant compte de ces résultats, il est probable que les populations de *Pratylenchus* spp. aient été contenues dans les sols de ces parcelles, bien que ce nématode soit considéré comme pathogène envers la culture d'ananas (Ayala *et al*., 1963).

Par ailleurs, en situation de faible niveau d'intrants, la suppression de *Pratylenchus* spp. a été complète dans les sols des parcelles précédées d'ananas. Ce résultat, fort intéressant, peut être vraisemblablement expliqué par l'intense activité biologique observée au sein de ces parcelles, stimulant une régulation biologique naturelle (Lavelle, 2002). De même, la faible abondance de *Pratylenchus* spp ou l'absence quasi-totale de *R. similis* observée dans les sols ou les racines des bananiers des parcelles pérennes échantillonnées, s'expliqueraient par le niveau élevé de fertilité chimique et biologique observée dans ces parcelles.

A contrario, la plus forte densité d'*Helicotylenchus* spp. observée dans les bananeraies pérennes montre que ce nématode spiralé, ectoparasite, est plus persistant à faibles doses d'intrants qu'à fortes doses. Ce même résultat a été obtenu par Pierrot *et al*. (2002) dans des plantations de plantains, situées au Cameroun. Les travaux de Tixier (2008) et Quénéhervé *et al*. (2011) permettent d'expliquer ces résultats. Ces auteurs ont démontré l'existence d'une compétition interspécifique entre *R. similis* et *H. multicinctus*. En les combinant, ils ont constaté que l'abondance d'*H. multicintus* a été augmentée tandis que celle du *R. similis* diminuée légèrement. Cela peut s'expliquer par des différences dans les taux de multiplication de ces nématodes (Duyk *et al*., 2012). De plus, la dynamique des racines de bananiers peuvent modifier le rapport de *H.multicinctus* à *R. similis* (Quénéhervé *et al*., 2011). Dans notre cas, la proportion de vieilles racines (ressource potentielle pour *H. multicinctus*) a augmenté plus que celle de jeunes racines (ressource potentielle pour *R. similis*) dans les parcelles de banane pérenne (Quénéhervé, 1990 ; Tixier *et al*., 2008).

D'autres auteurs suggèrent que la composition physico-chimique des sols peut contribuer à la nature des communautés de nématodes et interférer avec les compétitions entre

espèces (Mateille *et al*., 1992). Quénéhervé (1998) a montré que si *R. similis* n'était pas affecté par les caractéristiques des sols, *H. multicinctus* était prédominant sur les sols limoneux ou argileux à forte concentration en matière organique et à faible pH. Nos résultats confortent donc les travaux de ces chercheurs en termes d'abondance d'*Helicotylenchus* spp. et d'absence de *R. similis* dans les bananeraies pérennes.

L'absence de fertilisation, dans les parcelles ayant pour précédent le manioc en Haïti, a un effet négatif sur la nématofaune du sol. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conditions climatiques (sécheresse) et pédologiques (sols dénudés, forte pierrosité) ne sont pas favorables au maintien d'une bonne qualité du sol dans ces parcelles. Il faut ajouter à cela les problèmes liés à la pénurie d'eau, contraignant à 1 ou 2 arrosages par mois, au lieu de 2 arrosages par semaine comme Quénéhervé *et al.* (2005) l'ont recommandé.

En outre, comme nous l'avons dit précédemment, l'absence totale d'apports de fertilisants à un sol peut renforcer l'absence quasi-totale de l'activité biologique du sol (Villenave *et al*., 2012). Selon ces auteurs, cela peut conduire à une simplification de la micro-chaîne trophique du sol : les densités de nématodes observées dans le traitement labouré étaient environ 20 fois plus faibles que celles observées dans le traitement en semis direct recevant la plus forte fertilisation. Des résultats similaires ont été obtenus par Fu *et al*. (2000).

Dans notre étude, le précédent ananas semble exercer une régulation sur les populations de charançons supérieure à celle enregistrée pour tous les autres précédents culturaux. Ceci se traduit par un plus faible pourcentage de galeries observées au niveau des bulbes de plantains. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu par Auguste (2012). En effet, grâce à un système de piégeage de charançon adulte, placé au sein de ces mêmes parcelles, cet auteur a montré que, les systèmes de culture avec un précédent ananas ou jachère ont une population de charançons plus faible. Ceci peut être expliqué d'une part, par l'effet assainissant : i) de l'ananas qui est probablement non-hôte des larves et des adultes du charançon noir et ; ii) de la jachère sur les populations de charançons adultes uniquement. Cependant, on constate que le pourcentage de galeries, creusées par les larves de charançons, ne dévoile pas forcément le niveau d'infestation d'une parcelle par les populations de charançons adultes.

Selon ces constatations, l'estimation de l'état sanitaire des plants au sein d'une parcelle, ne devrait pas être établie uniquement avec les connaissances référant au taux de charançons capturés par des pièges à phérormones. Bien que les populations de charançons adultes, soient plus abondantes dans les parcelles de banane pérenne (Auguste, 2012), leurs

larves, cependant, n'ont pas provoqué plus de dégâts au niveau des bulbes de plantains. En revanche, malgré le nombre plus faible de charançons adultes capturés en précédent banane, les dégâts causés par les larves de ceux-ci ont été plus importants que ceux mesurés dans les autres parcelles. Ce résultat prouve que le degré d'infestation des bulbes ne dépend pas systématiquement de l'abondance de charançons adultes piégés dans une parcelle.

Les parcelles conduites avec un tel système de culture (banane/banane) pourraient devenir encore plus vulnérables lorsqu'on y associe une pratique culturale intensive. Selon cette hypothèse, les résultats obtenus dans les parcelles de banane pérenne prouvent que lorsque celles-ci sont conduites de manière non intensive, les sols jouissent d'une meilleure activité biologique et fertilité chimique (grâce aux apports de matière organique et au travail réduit du sol). Dans ces conditions, la haute fertilité chimique et les apports de matière organique semblent augmenter le bio-contrôle naturel des pathogènes (Altieri, 1999). Dans ces sols, ces agents pathogènes causent peu ou pas de maladie, en dépit d'un environnement apparemment favorable (Baker & Cook, 1974).

Il est vrai qu'en choisissant un système de culture basé sur une rotation ananas/banane ou banane pérenne et en apportant de faible doses d'intrants aux parcelles, on maintient une meilleure qualité dans les sols (haute activité biologique et fertilité chimique) ; ce qui permet vraisemblablement, un meilleur contrôle des bioagresseurs telluriques. Toutefois, ces systèmes de culture et/ou ces pratiques culturales permettent t-ils d'améliorer le rendement du plantain ? Est-ce que le fait de maintenir une meilleure qualité du sol est une condition suffisante pour maintenir un rendement élevé ?

En conclusion, les précédents ananas et jachère ainsi que les plantations de bananiers pérennes (où des engrais organiques sont apportés, présence de cultures associées, réduction du travail du sol…) sont de bonnes pratiques culturales dans la lutte contre les pathogènes telluriques du plantain ; tandis que les plantations de banane/banane (cultivées de manière conventionnelle) se révèlent de très mauvaises pratiques culturales dans la régulation de ces agents pathogènes. Le fort niveau d'intensification entraine le déséquilibre biologique de la faune du sol qui se traduit par la prolifération des populations de nématodes phytoparasites du plantain et la diminution des ingénieurs de l'écosystème.

IV.1.3- EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE RENDEMENT DU PLANTAIN

Les plus forts rendements des parcelles précédées d'une culture d'ananas ou d'une jachère peuvent s'expliquer, *a priori*, par la rémanence des fortes doses d'intrants apportées à celles ci. D'une part, on peut penser que les apports de nématicides et d'insecticides contribuent à l'amélioration de l'état sanitaire de la plante en réduisant la pression du cortège parasitaire des sols (y compris les équilibres biologiques), ce qui favoriserait une meilleure croissance de la plante, et ce, malgré leurs effets néfastes sur la faune édaphique.

D'autre part, les apports de forte quantité d'engrais minéraux amélioreraient le rendement de la plante via une meilleure disponibilité des éléments nutritifs, indispensables à la croissance de celle-ci (Lavelle *et al*., 1998). Il en résulte une meilleure circonférence du pseudotronc et aussi, un meilleur remplissage des doigts des régimes, si les conditions climatiques sont bonnes. Notons toutefois, que ces améliorations de rendement sont instantanées, à l'échelle d'un cycle ou deux (pour certains systèmes de cultures) ou voire inexistantes (dans le cas du système de culture banane/banane), et la durabilité des plantations est compromise par le niveau d'infestation parasitaire. Ce résultat confirme : i) que cette dernière pratique culturale en favorisant le développement des bioagresseurs telluriques inféodés à la culture de banane plantain, n'améliore pas nécessairement le rendement de celle-ci ; ii) l'effet négatif de ces bioagresseurs et donc le mauvais état sanitaire des plants échantillonnés dans ces parcelles. De fait, l'état sanitaire d'une plante étant déterminant dans l'élaboration de son rendement.

Les rendements en Guadeloupe sont plus élevés dans les parcelles travaillées intensivement. Cependant, ceux-ci sont similaires à ceux observés dans les parcelles d'Haïti travaillées à un faible niveau d'intensification. On pourrait imaginer qu'il y a peut être d'autres facteurs, le climat ou le drainage du sol qui pourraient expliquer cela. De plus, le rendement étant estimé via la circonférence des bananiers prise à la floraison, celui-ci peut ne pas être similaire à la récolte des régimes dans les deux régions. Car, le remplissage des doigts des régimes est souvent affecté par les conditions climatiques (selon la saison) et aussi, par la disponibilité des engrais chimiques jouant un rôle déterminant dans le remplissage des doigts des régimes.

Par ailleurs, Fortin *et al*., 2008 soulignent que, les mycorhizes pourraient contribuer à l'amélioration de la croissance des plantes et impacter positivement sur le rendement de celles-ci, si seulement la teneur en phosphore (principal facteur de la production) du sol soluble est modérée à faible (généralement moins de 100 ppm). Dans notre étude, plus particulièrement en Guadeloupe, la teneur en phosphore dépasse très largement 100 ppm (toutes parcelles confondues), ce qui fait que la plante a moins besoin des mycorhizes, du

moins en ce qui a trait à la nutrition en phosphore (Fortin *et al*., 2008). Dans ces conditions, les mycorhizes n'ont, vraisemblablement, pas pu s'exprimer assez, au point d'impacter positivement le rendement des bananiers plantains.

Les bioagresseurs telluriques, contribuent t-ils à diminuer le rendement du plantain ou pas, à l'echelle de 2 ou 3 cycles ?

Minz *et al*. (1960) affirment qu'en absence de *R. similis*, d'autres nématodes comme *Meloidogyne* spp. et *H. multicinctus*, peuvent être aussi la cause de baisse du rendement des bananiers. Ce même résultat a été obtenu, concernant *H. multicinctus*, par Cadet *et al*. (2007). Toutefois, certains chercheurs affirment que ce nématode est considéré comme peu pathogène pour les bananiers (Feller *et al*., 1990) et plantains (Moens *et al*., 2006. Nos résultats semblent corroborer ces derniers résultats. Selon nos analyses, l'abondance d'*Helicotylenchus* spp. observée dans les parcelles de banane pérenne n'a aucun impact significatif sur le rendement du plantain.

En revanche, le faible rendement observé dans les parcelles précédées de la culture banane (quelque soit le niveau d'intrants) s'explique probablement par l'importance de la pression parasitaire dans ces parcelles. Celle-ci se traduit non seulement, par l'abondance de *Pratylenchus* spp. (sol et racines) et le taux élevé de nécroses bulbaires qu'on y observe mais aussi, du taux élevé de nécroses racinaires (Auguste, 2012). La croissance optimale d'un plant ainsi que son rendement dépendent de l'état de santé de ses racines capables d'explorer efficacement le sol, ménageant une bonne alimentation hydro-minérale à la plante (Filter, 1996 ; Rosales, & Ramiro, 2004 ; Sen, 2005). Il est probable dans notre cas, que ce mauvais état sanitaire de la plante soit à l'origine de ce faible rendement. En effet, il y aurait un seuil d'infestation racinaire (par exemple 4000 *R. similis* pour 100g de racines d'après Mateille *et al.*, 1992) au dessous duquel le plantain tolère bien leur présence et à partir duquel il devient sensible. Si on considère ce seuil de nuisibilité dans le cas de *Pratylenchus* spp., on constate qu'on est bien au dessus de celui-ci (de 4241 à 323.437 *Pratylenchus* spp. pour 100 g de racines (Auguste, 2012)).

En Haïti, le faible rendement observé dans les parcelles précédées de banane et de manioc s'expliquerait en partie par les mauvaises pratiques culturales (choix du précédent sans fertilisation notamment), mais surtout par les conditions climatiques et pédologiques particulièrement contraignantes. De plus, lorsque le niveau de fertilité biologique et chimique est faible, il est difficile voire impossible d'améliorer le rendement de la plante. Il est

important de souligner qu'un peu d'intensification, même chimique, est nécessaire pour améliorer les performances de la culture du plantain. Car, en Guadeloupe comme en Haïti, on constate que la fertilité (biologique et chimique) du sol et le rendement du plantain sont meilleurs lorsqu'une quantité d'engrais chimiques (faible ou élevée) est apportée aux plants. Autrement dit, en absence totale de fertilisation, le rendement est relativement faible. Il est de surcroît réduit lorsqu'on y ajoute les nécroses foliaires liées à la maladie des raies noires, provoquée par le champignon *Mycosphaerella figiensis*.

Le fort taux de nécroses foliaires, observé dans ces parcelles, contribuerait très fortement à ces baisses de rendement, qui peuvent facilement excéder 50%, si des pratiques culturales et des applications de fongicides ne sont pas utilisées (Stover, 1983). En l'état actuel de nos travaux et en absence d'une prise en compte effective de ces pertes de rendement, il est difficile de procéder à une évaluation objective de l'impact de cette maladie dans les bananeraies plantains en Haïti. Cet impact sera évalué plus facilement et de manière systématique en Guadeloupe où la maladie sévit depuis 2 ans, grâce à la mobilisation des acteurs (chercheurs, techniciens, agriculteurs, ouvriers) ayant une connaissance plus approfondie sur le contrôle de la Cercosporiose jaune dans les bananeraies de type Cavendish (*Musa* AAA) et à l'expertise acquise sur ce sujet.

En conclusion, lorsqu'on apporte de fortes doses d'intrants aux sols, on améliore le statut chimique et le rendement instantanné du bananier plantain, sans en réduire la pression parasitaire. Néanmoins, le rendement observé à fort intrant, quoique plus élevé, n'est pas significativement différent de celui observé dans les parcelles recevant de faibles doses d'intrants. L'absence totale de fertilisation se révèle une mauvaise pratique culturale pour favoriser l'amélioration du rendement du plantain. De plus, la présence des nécroses foliaires, dues à la Sigatoka noire, dans les parcelles traitées sans fertilisants ne fait que renforcer cette baisse de rendement.

D'après notre analyse, les pratiques culturales peu ou non intensives permettent de mieux contrôler les bioagresseurs du plantain.

Les bonnes pratiques agricoles permettent t-elles d'assurer la durabilité de la culture plantain, sans qu'il y ait une baisse de rendement après 2 à 3 cycles, comme c'est le cas des parcelles travaillées intensivement ?

Quelles pistes faut-il préconiser pour maintenir une bonne qualité du sol tout en optimisant les performances du plantain ?

Les pratiques agro-écologiques telles que l'utilisation d'une plante de service et/ou du vermicompost associée avec un matériel végétal sain « PIF », planté sur un sol assaini (jachère par exemple), permettent t-elles de pallier aux problèmes telluriques qui sévissent dans les bananeraies plantains ?

Quels sont les avantages et inconvénients dans la mise en œuvre de ces pratiques dites agro-écologiques ?

Ces questions seront traitées dans le paragraphe suivant.

IV.2- EXPÉRIMENTATION SUR LES PRATIQUES INNOVANTES EN STATION DE RECHERCHE

Dans ce chapitre, nous discuterons des résultats selon trois angles : i) l'influence des pratiques innovantes (plants sains « PIF », vermicompost, plante de service *P. notatum*) sur l'activité biologique et fertilité du sol, ii) leur influence sur le parasitisme tellurique au regard de la santé de la plante ; iii) leur influence sur la productivité de la plante.

IV.2.1- INFLUENCE DES PRATIQUES INNOVANTES SUR L'ACTIVITE BIOLOGIQUE ET LA FERTILITE DU SOL

- ***Influence du P. notatum***

L'activité biologique du sol est meilleure en présence de *P. notatum* comparées aux parcelles où sont appliqués des herbicides. Ceci s'explique par l'augmentation de l'abondance d'ingénieurs du sol (notamment du ver de terre endogé *P. corethrurus*) et de transformateurs de litière observée en présence de cette plante de service. Certains auteurs soulignent que l'installation d'une plante de service permet d'augmenter significativement la biodiversité du sol (Blanchart *et al.,* 2006 ; Dupont *et al.,* 2009)

Comme l'ont montré Dorel *et al*. (2011), l'effet régulateur ? du *P. notatum* sur les nématodes phytoparasites inféodés au bananier plantain a été confirmé au cours de notre étude. En effet, nous avons noté une faible abondance de *Pratylenchus* spp. dans les racines de plantain en présence de cette plante de service. Selon Dorel *et al*. (2011), à partir d'essais réalisés avec plusieurs plantes de service en association avec le bananier (dessert) en Guadeloupe et en Martinique, on observe une régulation plus efficace des nématodes phytoparasites en présence de *P. notatum*. Selon ces auteurs, cette régulation ne dépend pas seulement de l'augmentation de l'abondance des nématodes prédateurs mais aussi de la structuration globale du réseau trophique, avec notamment un rôle important pour les

nématodes omnivores. Ils concluent que, les plantes de la famille des graminées semblent plus favorables à la régulation des nématodes phytoparasites en bananeraies, que celles de la famille des légumineuses.

L'absence quasi-totale de nématodes phytoparasites dans les racines du *P. notatum* confirme l'aspect non-hôte de cette plante de service vis-à-vis de ces parasites telluriques. Dans une étude récente, Djigal *et al*. (2012) montrent que l'abondance des groupes trophiques de nématodes, excepté les phytoparasites, tend à augmenter avec l'introduction des plantes de service (*P. notatum* notamment). Notons que, cette plante est une bonne alternative à l'utilisation des herbicides dans le contrôle des adventices, en raison de son aptitude à la couverture du sol. En contribuant à supprimer les applications d'herbicides, on maintient indubitablement, une bonne qualité des sols. Ainsi, on peut espérer que le *P. notatum* permettra d'améliorer le rendement après 2 à 3 cycles comparativement, aux parcelles traitées avec des herbicides.

➢ *Influence du vermicompost*

L'activité biologique du sol semble être meilleure lorsqu'on y apporte du vermicompost ; celle-ci se traduit par la forte abondance des ingénieurs (notamment de *P. corethrurus*) et des transformateurs ainsi que par une augmentation de la diversité taxinomique. D'autre part, Villenave *et al.* (2007) ont montré que lorsque du compost est apporté pendant 6 années consécutives, celui-ci finit par impacter positivement les caractéristiques chimiques des sols. Cet impact positif n'apparaît pas au cours du 1er cycle de notre expérimentation probablement parce qu'il est trop tôt pour identifier un effet significatif du vermicompost sur les propriétés chimiques du sol.

Mentionnons en outre que la corrélation entre forts apports d'intrants chimiques et nématodes phytoparasites a été confirmée lors de cette étude. En effet, l'abondance des 2 principaux groupes de nématodes phytoparasites *R. similis* et *Pratylenchus* spp. est plus élevée dans les sols recevant des apports d'intrants chimiques que ceux recevant des apports de vermicompost. En parallèle, les apports de vermicompost ont entrainé une très forte diminution des populations de *Meloidogyne* spp. des racines des plants. Ces résultats confortent les travaux de nombreux chercheurs qui affirment que les composts (ou amendements organiques) peuvent être utilisés pour améliorer la production agricole, la santé du sol, les niveaux de nutriments, la matière organique, la croissance des plantes, la santé des plantes et également la suppression des maladies causées par les agents phytopathogènes telluriques (Chaney et al., 1980 ; Lumsden et al., 1983 ; Hoitink & Fahy, 1986 ; Mays &

Giordano, 1989 ; Mehta et al., 2014). Selon Noble & Coventry (2005), l'effet suppressif du compost sur les nématodes augmente généralement avec la quantité appliquée. De Clercq et *al.* (2004) et Vallad et *al.* (2003) signalent que les composts peuvent permettre l'activation des mécanismes de défense de la plante.

Tenant compte de ce qui précède, l'utilisation du vermicompost pourrait i) avoir un effet positif plus efficace que celle du compost, et ce, tant sur la qualité du sol que sur le rendement du plantain ii) être une méthode de lutte très efficace contre les bioagresseurs telluriques dans les bananeraies plantains, ce qui pourrait améliorer la productivité et la durabilité de celles-ci ; surtout quand il est appliqué sur un sol assaini et planté avec un matériel végétal sain comme les PIF.

L'inconvénient de cette méthode c'est la disponibilité des matières premières (effluents d'élevage, vers de terre issus du fumier, herbes, déchets végétaux, etc.) pour l'élaboration du vermicompost. Elle sera beaucoup plus facile à utiliser par les agriculteurs qui pratiquent de la polyculture-élevage.

- ***Influence du matériel végétal PIF***

La très faible abondance de *Pratylenchus* spp. observée dans les racines des plants sains obtenus par la méthode PIF prouve l'importance de l'utilisation d'un matériel végétal sain, indemne de nématodes, renforcée par l'assainissement du sol par la canne à sucre (plante non-hôte des parasites telluriques de la banane) suivi d'une jachère. En revanche, la très forte abondance de *Pratylenchus* spp. observée dans les racines des plants assainis ou pralinés par les méthodes conventionnelles prouve, malgré l'excellent précédent, la mauvaise qualité de ces plants qui étaient déjà infestés, et l'inefficacité de la technique d'assainissement (bulbe paré et traité au grésyl). Les méthodes conventionnelles d'assainissement se révèlent donc inefficaces dans la lutte contre les nématodes phytoparasites. Par ailleurs, le fort taux de nécroses racinaires observé dans les racines des plants non assainis est en étroite relation avec la forte densité de nématodes phytoparasites (*Pratylenchus* spp. notamment) qu'on y retrouve. Ce qui conforte l'idée que les rejets baïonnettes utilisés par les agriculteurs, pour la replantation de leur parcelle, sont le plus souvent fortement contaminés et donc en mauvais état sanitaire.

Par ailleurs, le taux de nécroses bulbaire est plus faible dans les bulbes des plants sains mais, il n'est pas significativement différent de celui observé dans les bulbes des plants assainis par pralinage. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les placettes ont été distribuées au hasard sur la parcelle expérimentale, ce qui favoriserait un effet de proximité

entre les traitements. Tenant compte de sa mobilité nocturne (en moyenne 30 cm/nuit ; Dorel *et al*., 2011), le charançon noir pourrait se déplacer d'une parcelle voisine à une autre, il en résulte la contamination de la plupart des plants sains. Enfin, les plants sains « PIF » se révèlent non efficaces pour lutter contre les attaques des larves de charançon noir, bien qu'ils soient efficaces contre les nématodes phytoparasites, les plus virulents pour le plantain (*R. similis, Pratylenchus* spp).

Dans les racines des plants PIF, la forte abondance de *Meloidogyne* spp. observée pourrait s'expliquer par i) le développement d'une certaine sensibilité de ces plants sains « PIF », à ce nématode à galles ; ii) ou simplement parce que ce nématode pourrait être un bon indicateur de l'état de santé des racines de ces plants sains. Toutefois, ce résultat est à confirmer à plus long terme et les conséquences potentielles de cette prolifération sur la santé de la plante et le rendement seront également à vérifier.

L'avantage de cette méthode réside dans le fait que le matériel végétal est indemne de ravageurs telluriques du plantain, et peut permettre de rallonger la durée de vie des plantations face aux attaques de ceux-ci. L'inconvénient de celle-ci c'est que l'agriculteur doit disposer d'une structure pour pouvoir produire en permanence ces plants sains et surtout lorsque l'exploitation est grande. Cependant, une autre technique doit être mise en place pour lutter efficacement contre le charançon du bananier (pièges à charançons, plantes insecticides, stimulation du développement de prédateurs spécifiques du charançon du bananier telles que certaines espèces de fourmis, de nématodes et de champignons entomopathogènes, …).

IV2.2- INFLUENCE DES PRATIQUES INNOVANTES SUR LA PRODUCTIVITE DU PLANTAIN

Lorsque le matériel végétal est sain le rendement est meilleur. Les plants sains « PIF » bénéficient d'un meilleur état sanitaire qui se traduit non seulement, par une meilleure circonférence mais aussi, par un meilleur rendement (circonférence et poids du régime) plus important, bien que celui-ci ne soit pas significativement différent de celui des plants pralinés. Ce même résultat a été obtenu par Mateille *et al*. (1992) dans des essais au champ. Ces auteurs affirment que la production par bananier (*Musa* AAA) a été significativement plus élevée dans le cas des vitro-plants que celui des rejets pralinés. Il est démontré que la croissance optimale et le rendement d'une plante résultent i) de la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs et ii) de la santé des racines et de leur capacité à explorer efficacement le sol, en facilitant un transfert efficace de nutriments et d'eau vers la plante (Fitter, 1996 ; Rosales & Ramiro, 2004 ; Sen, 2005 ; Draye *et al*., 2005 ; Barea *et al*., 2005).

Dans notre cas, on peut penser qu'une différence significative pourrait être obtenue en comparant le rendement des 2 types de matériel végétal (plants sains « PIF » *versus* plants assainis par pralinage), à partir du 2ème cycle de la plantation. Selon ce qui précède, la santé des rejets baïonnettes (issus du 1er cycle) pourrait être encore plus affectée que celle des rejets issus des plants sains, à cause de la pression parasitaire tellurique existant au sein de ces traitements. De plus, selon le constat fait, lors du décorticage des bulbes des plants (estimation des dégâts du charançon noir), les rejets des plants pralinés sont plus affectés que ceux des plants sains « PIF ». Dans ces conditions, le rendement des rejets issus des plants pralinés pourrait être, à l'avenir, significativement plus faible que celui des rejets issus des plants sains « PIF ». Nous insistons sur le fait qu'on est à la première année de mise en culture après une jachère de cinq ans, ce qui expliquerait l'absence d'une pression parasitaire au sein de la parcelle expérimentale.

IV.2.3- INFLUENCE DU NIVEAU D'INTENSIFICATION SUR LES COMPOSANTES DE LA FERTILITE DU SOL ET LE RENDEMENT DU PLANTAIN

Bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les 4 niveaux d'intensification (très intensif, moyennement intensif, faiblement intensif et « conduite agroécologique »), nos résultats montrent que lorsque les pratiques culturales sont très intensives, les ingénieurs du sol diminuent alors que les parasites telluriques augmentent. Ces résultats corroborent ceux obtenus dans les sols des parcelles recevant de fortes doses d'intrants en Guadeloupe, lors de notre diagnostic agroécologique. En effet, à fortes doses d'intrants, l'abondance de vers de terre diminue très fortement (199 ind.m^{-2} contre 403 ind. m^{-2} dans les parcelles agroécologiques). L'absence totale de *Pratylenchus* spp dans les parcelles travaillées intensivement peut être expliquée par l'effet suppressif des fortes doses d'intrants qu'on y apporte.

Comme nous l'avons vu lors du diagnostic réalisé en Guadeloupe, le rendement tend à être plus important à fortes doses d'engrais chimiques (pratiques très intenses) qu'avec les apports de vermicompost (pratiques agroécologiques). Toutefois, on ne décèle aucune différence significative entre ces 2 rendements ni entre les traitements intermédiaires. Le rendement obtenu avec les pratiques agroécologiques pourrait être augmenté si les quantités de vermicompost sont augmentées (3 Kg/plant à chaque apport au lieu de 1,5Kg/plant).

La fertilité chimique reste déterminante dans l'amélioration du rendement de la plante. On imagine que, si l'activité biologique du sol est maintenue par une plante de service et des

apports réguliers de vermicompost, la fertilité chimique du sol serait également maintenue et voire même renforcée. Et, dans le cas où l'on utilise, avec ceux-ci, des plants sains « PIF » plantés sur un sol préalablement assaini par une jachère (minimum 1 an) ou une culture d'ananas en rotation, on pourrait optimiser la productivité de la plante et la maintenir au-delà de 3 cycles avant la destruction de la plantation. Autrement dit, en menant une parcelle de manière agro-écologique, on assurerait la durabilité de celle-ci via une bonne qualité du sol (biologique, chimique, physique et hydrique), et une meilleure régulation biologique des bioagresseurs telluriques, ce qui se traduirait par un meilleur rendement.

En conclusion, les plants sains PIF permmettent d'améliorer le rendement et de réduire la pression parasitaire surtout quand ils sont plantés dans un sol assaini par une jachère appropriée. La plante de service *P. notatum* permet le maintien d'une bonne qualité du sol et donc les fonctions écosystémiques qui en découlent. L'utilisation du vermicompost permet également une meilleure fertilité biologique et chimique des sols et un meilleur contrôle des bioagresseurs telluriques (nématodes phytoparasites notamment).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'apport central de cette thèse concerne la mise en œuvre d'un « diagnostic agro-écologique », en lien avec les indicateurs *ad hoc*, pour analyser les impacts des systèmes de culture et des itinéraires techniques sur la durabilité et l'état sanitaire des bananeraies plantains de Guadeloupe et d'Haïti. En lien avec cette démarche, nous avons conduit une expérimentation au champ, en station de recherche, pour tester trois pratiques agroécologiques innovantes visant à améliorer l'état sanitaire des plantations de bananes plantains et leur durabilité. Pour ce faire, nous avons mobilisé un ensemble de concepts et d'outils pour faire aboutir nos objectifs de recherche, à savoir, i) l'identification des paramètres écologiques qui concourent à la performance agri-environnementale (maintien de la fertilité du sol, contrôle des parasites telluriques, niveaux de production) et la durabilité des systèmes de culture plantains ; ii) le test de pratiques innovantes pour lever les principaux facteurs sanitaires limitant la production de plantain dans nos zones d'étude, dans une perspective de renforcement de la durabilité des systèmes de culture. La conduite du diagnostic agroécologique, en Guadeloupe et en Haïti, a permis de mieux cerner les problèmes auxquels font face les plantations de plantains dans ces deux régions, et l'expérimentation au champ a validé l'intérêt de certaines pratiques agro-écologiques concourant à l'amélioration de la gestion sanitaire de la culture du plantain. Ceci constitue une étape importante pour l'adoption de ces pratiques innovantes dans les exploitations de bananes plantains.

Sur le plan agronomique, cette étude montre que le choix des successions culturales et de la jachère constitue un principe fondamental pour l'assainissement des sols vis-à-vis des bioagresseurs telluriques (nématodes phytoparasites du plantain et du charançon noir). Afin de créer un vrai vide sanitaire au sein de la parcelle, il conviendrait d'éliminer les souches et rejets infestés avant de laisser la parcelle en jachère (au minimum un an) et de cultiver une plante de service (légumineuse ou graminée de préférence), non-hôte de nématodes phytoparasites. En sus de la jachère, l'ananas se révèle être un bon précédent cultural contre la prolifération des bioagresseurs telluriques nuisibles au plantain. La limitation des quantités de résidus dans les parcelles permettrait un contrôle des populations. L'effet de la réorganisation des résidus de culture sur la dynamique spatiale du charançon est encore méconnu. Leur utilisation comme levier d'action pour limiter la dynamique du bioagresseur est à envisager.

En outre, lorsque le système de culture ananas/plantain est associé à un faible niveau d'intensification, celui-ci favorise une bonne activité biologique des sols. Par ailleurs, le travail réduit et les apports de matière organique aux sols dans les bananeraies pérennes

permettent de maintenir une bonne activité biologique comme en témoigne la plus forte abondance d'agrégats biogéniques et la haute fertilité chimique. Ces pratiques agricoles se révèlent appropriées et efficaces dans le contrôle biologique naturel des bioagresseurs telluriques.

A l'opposé, la succession banane/banane fragilise très fortement la durabilité de la culture du plantain, et ce, quelque soit le niveau d'intensification. À l'instar du bananier plantain, le manioc semble être un mauvais précédent cultural à la culture du plantain, surtout quand celui-ci est cultivé sans apport de fertilisants. Dans ces conditions, la culture du plantain ne devrait pas être envisagée sur des parcelles ayant plantées en banane ou en manioc si on veut en optimiser la production.

Les fortes doses d'intrants apportées aux parcelles précédées d'ananas ou de jachère ont permis d'optimiser le rendement du plantain, et ce, malgré les effets négatifs sur la qualité du sol. En revanche, lorsque le précédent est le bananier, les fortes doses d'intrants ont été sans effet sur le rendement. De manière générale, les pratiques culturales intensives permettent certes une amélioration du rendement des plantains mais, celles-ci contribuent à la dégradation de la qualité du sol via une diminution de l'activité des ingénieurs du sol et une baisse de la fertilité chimique, alors que les pratiques culturales peu ou pas intensives permettent de maintenir la qualité du sol. C'est précisément ce que l'on a constaté en testant les trois pratiques innovantes vermicompost, plante de service *Paspalum notatum* et plants sains « PIF ». Ces pratiques se révèlent être très efficaces pour lutter contre les bioagresseurs telluriques dans les bananeraies plantains. Elles fournissent les services écosystémiques recherchés tels une régulation biologique naturelle optimale des bioagresseurs, une bonne qualité chimique et biologique des sols, une productivité élevée, qui pourrait sans doute augmenter la durée de production des plantations.

D'après nos premières observations, nous recommanderions la combinaison de ces trois pratiques avec l'augmentation des quantités de vermicompost apportées par plant. Ceci permettrait d'optimiser : i) l'activité biologique du sol, ii) le contrôle biologique des bioagresseurs telluriques, et iii) également la productivité du plantain. Nous estimons, que ces conditions sont indispensables pour rendre durables les plantations de plantains et réduire voire supprimer l'utilisation massive des produits chimiques. Cependant, le prolongement de cette démarche a un coût et necessite des moyens humains pour assurer l'entretien de la plantation. Ainsi, l'appropriabilité de ces pratiques innovantes par les agriculteurs infortunés pourrait se révéler difficile voire impossible.

Sur le plan nématologique, cette étude a montré que *Pratylenchus* spp est plus abondant dans les bananeraies plantains, et probablement plus virulent que *R. similis*. L'abondance de *Pratylenchus* spp, a influencé négativement la prolifération de *R. similis* en inhibant celle-ci via la compétition. Cet antagonisme prévalerait également entre *Helicotylenchus* spp. et *R. similis*, avec comme effet, la suppression de *R. similis* dans les sols des bananeraies pérennes.

Nous avons constaté par ailleurs que le taux d'infestation d'une parcelle par les populations de charançons noirs adultes n'est pas corrélé aux dégâts que peuvent causer les larves de ceux-ci, dans les bulbes des bananiers plantains. Néanmoins, tenant compte des conclusions précédentes, notre hypothèse de départ selon laquelle une plantation conduite de manière agroécologique (assainissement des parcelles et diminution des intrants chimiques) est moins soumise à l'attaque des bioagresseurs telluriques, tout particulièrement des nématodes, a bien été vérifiée dans notre étude.

L'analyse du rendement des bananeraies plantains n'a pu être réalisée correctement, du fait de la conduite échelonnée des récoltes par les agriculteurs, dans une même parcelle ou entre différentes parcelles. Pour améliorer le dispositif de diagnostic, il serait donc nécessaire d'assurer un suivi des plants diagnostiqués (de concert avec les agriculteurs) de la floraison à la récolte. L'importance de ce suivi réside dans le fait que, de forts taux de pertes peuvent être enregistrés avant la récolte, en lien avec les accoups climatiques saisonniers (verse, sécheresse), pouvant entacher l'interprétation des données de rendement mesurées seulement à partir de la circonférence du pseudo-tronc et du nombre de doigt par régime, entre la floraison et la récolte. Il faudrait adapter le nombre de bananiers diagnostiqués en fonction de la taille de la parcelle, et aussi de la topographie de celle-ci.

Dans le cas d'Haïti, il serait souhaitable de réaliser une étude pour évaluer l'impact de la Cercosporiose noire dans les plantations de plantains et de rechercher des méthodes de contrôle agroécologique pour maitriser cette maladie. En Colombie, dans le cadre du projet Alterbio « Alternatives biologiques pour des plantations durables des systèmes de cultures à base plantain », l'utilisation de lixiviats de hampe de plantain comme fongicide naturel constitue une piste intéressante actuellement en cours d'évaluation.

Les innovations testées dans ce travail de thèse ont été menées sur des petites parcelles de 9m² durant un cycle, il serait souhaitable de réaliser un suivi des performances du plantain sur plusieurs cycles. De plus, des essais sur de plus grandes parcelles chez des agriculteurs sont à réaliser sur le long terme, ce qui leur facilitera l'adoption de ces innovations agro-écologiques. Afin de renforcer les effets bénéfiques de ces pratiques innovantes, il

conviendrait de les mener sur des parcelles précédées d'une jachère ou d'ananas. Après mise en jachère, il est recommandé de placer les pièges dans les bordures de la parcelle détruite afin de limiter la contamination des parcelles avoisinantes (Rhino *et al.*, 2010). La mise en jachère des parcelles pendant plusieurs mois permet de priver l'insecte de ses ressources, d'où une diminution des populations due à la perte des lieux de ponte et l'émigration des individus vers des parcelles plantées avoisinantes (Gold *et al.*, 2001).

Le respect de ces recommandations permettrait de minimiser les effets de proximité ou de topographie (transfert éventuel des intrants chimiques et de charançon noir adulte d'une parcelle à une autre). Toutefois, ces recommandations peuvent ne pas être appliquées telles qu'elles sont proposées, pour des raisons de foncier (cas des petits agriculteurs infortunés). Dans ce dernier cas, il conviendrait de planter aux pourtours des parcelles des plantes répulsives, non-hôte des bioagresseurs telluriques (la canne à sucre par exemple) ou de planter des arbres (caféier, cacaoyer, etc.) ou d'autres plantes en association avec les bananiers plantains (ananas, haricots, *Cajanus cajan*, etc.).

Enfin, il reste encore beaucoup à faire en terme de suivi à moyen et long terme : i) de la qualité du sol à travers sa faune (microfaune, mésofaune et macrofaune) et de son impact sur le contrôle biologique des bioagresseurs telluriques et la durabilité des plantations ; ii) des populations des parasites telluriques et des maladies aériennes, afin de voir à quel moment celles-ci atteignent le seuil de nuisibilité pour la survie de la plantation ; iii) des performances en production lorsque la fertilisation est exclusivement organique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adekunle, O.K., Fawole, B., 2002. Chemical and non-chemical control of Meloidogyne incognita under field conditions. Indian Journal of Nematology 32, 1-8.

Akello, J, Dubois, T, Coyne, D, Kyamanywa, S, 2008. Effect of endophytic Beauveria bassiana on populations of the banana weevil, Cosmopolites sordidus, and their damage in tissue-cultured banana plants. Entomologia Experimentalis et Applicata 129 : 157-165.

Akello, J, Dubois, T, Coyne, D, Kyamanywa, S, 2009. The effects of Beauveria bassiana dose and exposure duration on colonization and growth of tissue cultured banana (Musa sp.) plants, Biological Control, Volume 49, 6-10.

Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems, Agriculture, ecosystems and Environment 74, 19-31.

Altieri, M., Nicholls, C.I, 2002. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales.Manejo integrado de plagas y agroecollogia (Costa Rica). 64, 17-24.

Altieri, M., Nicholls, C.I, 2003. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. Soil & Tillage Research 72, 203–211

Altieri, M.A., Nicholls, C.L., 2005. Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. In Agroeco.org. Publications. http://www.agroeco.org/doc/agroecology-engl-PNUMA.pdf.

Alvarez, G., Aubert, C., Basson, A., Berry, D., Bodet, J.M., Chantelot, E., Chaussod R.,Cheroux, M., Cluzeau, D., Crete, X., Jamar, D., Leclerc, B., L'homme, G., Gautronneau, G., Godden, B., Houot, S., Lemarie, C., Hopiteau F.L., Mathieu, Y., Metzger, L., Morand, P., Mouchart, A., Nicolardot, B., Parat, J., Salducci, X., Tilmant, D.S., 2002. Activités biologiques et fertilité des sols : lntérêts et limites des méthodes analytiques disponibles. 27 p.

Anderson, J.-M., Ingram, J.S.I, 1993. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods.C.A.B International: 1-6.

Angers, D.A., Samson, N., Legere, A., 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. Dans : *Can. J. Soil Sci*., 73(1), pp. 51-59.

Arancon, N.Q., Galvis, P., Edwards, C., Yardim, E., 2003. The trophic diversity of nematodes communities in soil treated with vermicompost. Pedobiologia, 47, 736–740.

Araya, M., De Waele, D., 2005. Effect of weed management on nematode numbers and their damage in different root thickness and its relation to yield of banana (Musa AAA cv. Grande Naine) *Crop Protection*, Volume 24, Issue 7, 667-676.

Augé, R.M., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza. 11, 3-42.

Auguste, J.J., 2012. Diagnostic agro-écologique des systems de culture à base de bananiers plantains en Guadeloupe: Etat physio-chimique des sols et état sanitaire de la culture. Mémoire de fin d'études - Master, Université des Antilles et de la Guyane, 43 p.

Ayala, A., Roman, J., Gandita, H., 1963. Effect of soil fumigation used in the control of pineapple nematodes in Puerto Rico. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico 17, 76-90.

Bachelier, G., 1978. *La Faune du Sol, son Ecologie et son Action*. OSRTOM: Paris

Back M.A, Haydock P., Jenkinson P., 2002. Disease complexes involving plant parasitic nematodes and soilborne pathogens. Review article. Plant Pathology 51, 683-697

Baker, K.F., Cook, R.J., 1974. Biological Control of Plant Pathogens. W. H. Freeman and Co., San Francisco, p. 433.

Bananuka, J.A, Rubaihayo, P.R., Zake, J.Y.K., 2000. Effect of organic mulches on growth, yield components and yield of East African Highland bananas. Acta Hort. (ISHS) 540, 293-300.

Barea, J.M., Azcon, R., Azcon-Aguilar, C., 2005. Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. In: Bus- cot, F., Varma, A. (Eds.), Microorganisms in Soils : Roles in Genesis and Functions. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 195–212.

Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. Ecological Economics, 64 (2) :269-285.

Barros, E., Pashanasi, B., Constrantino, R., Lavelle, P., 2002. Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia Biology and Fertility of soils 35: 338-347.

Beare, M.H., Hendrix, P.F., Coleman, D.C., 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 777–786.

Birchfield, W., 1957. Observation on the longevity without food of the burrowing nematode. Phytopathology 47, 161–162.

Black, R., Tinker, P.B., 1979. The development of endomycorrhizal root systems: Effect of agronomic factors and soil conditions on the development of vesicular arbuscular infection in barley and on the endophyte spore density. New Phytol. 83: 401-413.

Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., Lavelle, P. & Brussaard, L., 1999. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. Earthworm Management in Tropical Agroecosystems: 149-172.

Blanchart, E., Villenave, C., Viallatoux, A., Barthès, B., Girardin, C., Azontonde, A., Feller, C., 2006. Effect of a cover plant (Mucuna pruriens var. utilis) on the

communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in South Benin. Eur. J. Soil Biol. 42, 136-144.

Blomme, G., Swennen, R., Tenkouano, A., 2003. Evaluation de la profondeur d'enracinement chez le bananier dans deux systèmes de culture MusAfrica 1 (1) 2-3.

Blouin, M., Zuily-Fodil, Y., Pham-Thi, A.-T., Laffray, D., Reversat, G., Pando, A., Tondoh, G., Lavelle, P., 2005. Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites Ecology Letters, (2005) *8*: 202–208.

Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. Agricultural Systems76: 639-653.

Bolan, N.S., 1991. A critical review of the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant & Soil 134 : 189-207.

Bonan, H., et Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n°2001-070, 77p.

Boyer, J., 1998. Interactions bilogiques (faune, ravbageur, parasites, microflore) dans des sols sous cultures en milieu tropical humide (Ile de la Réunion). In, p. 220. Paris VI.

Brévault, T., Bikay, S., Maldès, J. M., Naudin, K., 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. Soil and Tillage Research **97**(2): 140-149.

Bridge, J., Fogain, R., Speijer, 1997. Les nematodes des bananiers. *Pratylenchus* coffeae (Zimmermann, 1986) Filip. & Schu. Stek., 1941. *Pratylenchus* goodeyi Sher & Allen, 1953. Parasites et ravageurs des Musa : fiche technique N° 2. Bureaux, Farnham Royal, 318 pp.

Brown, G.G., Barois, I., Lavelle, P., 2000. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. Eur. J. Soil Biol. 36, 177-198.

Brussaard, L., 1998. Soil fauna, guilds, functionnal groups and ecosystem processes. *Applied Soil Ecology* **9**, 123-135.

Cadet, P., Guichaoua, L., Spaull, V.W., 2004. Nematodes, bacterial activity, soil characteristics and plant growth associated with termitaria in a sugarcane field in South Africa, Applied Soil Ecology 25, 193-206.

Cadet, P., Masse, D., Thioulouse, J., 2005. Relationships between plant-parasitic nematode community, fallow duration and soil factors in the Sudano-Sahelian area of Senegal.Agriculture, Ecosystems and Environment, 102**,** 302-317.

Cadet, P., Berry, S.D., Leslie, G.W., Spaull, V.W., 2007. Management of nematodes and a stalk borer by increasing within-field sugarcane cultivar diversity. Plant Pathology 56, 526–535.

Carpenter, S.R., Bennett, E.M., Peterson, G.D., 2006. Scenarios for Ecosystem Services: An Overview. Ecology and Society, 11, 29.

Chabrier c., Mauléon H., Quénéhervé P., 2002. Combination of Steinernema carpocapsae (Weiser) and pheromone lure : a promising strategy for biological control of the banana black weevil Cosmopolites sordidus (Germar) on bananas in Martinique (Abstr.), *Nemat%gy* 4, 190-191.

Chabrier, C., Hubervic, J., Quénéhervé, P., 2004. Evaluation de l'efficacité de deux formulations d'oxamyl contre les nématodes et charançons des bananaiers à la Martinique. Nematropica 35 , 11-21.

Chabrier, C., Tixier, P., Duyck, P.F., Carles, C., Quénéhervé, P., 2010. Factorsinfluencing the survivorship of the burrowing nematode,Radopholus similis (Cobb) Thorne in two types of soil from banana plantations in Martinique. Appl. Soil Ecol. 44, 116–123.

Chagüeza, V.Y., 2011. Alternativas biologicas para el control de nematodos fitoparasitos en cultivo del platano. Tesis 99 p.

Chaney, R.L., Munns, J.B., Cathey, H.M., 1980. Effectiveness of digested sewage sludge compost in supplying nutrients for soilless potting media. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 150, 485–493.

Chaussod, R., 1996. La qualité biologique des sols : Evaluation et implications. Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? » Paris-Numéro spécial

Chauvel, A., Grimaldi, M., Barros, E., Blanchart, E., Desjardins, T., Sarrazin, M., Lavelle, P., 1999. Pasture damage by an Amazonian earthworm. Nature **398**: 32-33.

Chevrollier, T., 2009. La faune du sol dans l'agriculture : cas de la banane, sous différentes pratiques culturales mémoire de fin d'études- Master, Université des Antilles et de la Guyane, 40 p.

Clermont-Dauphin, C., Meynard J.M., Cabidoche Y.M., 2003. Devising fertiliser recommendations for diverse cropping systems in a region : the case of bean maize intercropping in a tropical highland of Haiti. *Agronomie*. 23, 673-681.

Clermont-Dauphin, C., Cabidoche, Y.M., Meynard, J.M., 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French west indies. 20, 105-113.

Clermont-Dauphin, C., Cabidoche Y.M., Meynard J.M., 2005. Diagnosis on low-input cropping systems in a tropical upland of Southern Haiti. *Agric ecosys environ*. *Volume 105, Issues 1-2, January 2005, Pages 221-234.*

Cluzeau, D., Lebouvier, M., Trehen, P., Bouché, M.B., Badour, C., Perraud, A., 1987. Relations between earthworms and agricultural practices in the vineyards of Champagne. Preliminary results. In 'On earthworms' (Eds. Omodeo P.) Selected Symposis and Monographs U.Z.I., Modena (Italie), pp 465-484.

Cluzeau, D., Guo, Z.T., Chaussod, R., Esmenjaud, D., Fedoroff, N., Normand, M., Valentin,G., 1990. Etats structuraux et biologiques des sols du vignoble de Champagne. Rapport scientifique, Conseil Régional Champagne-Ardennes - SUAD Marne - Université de Rennes I, 2 vol., 124p. & 110p.

Cornaille, T., 2002. La Guadeloupe en 2001. Publication de l'Institut d'Emission des Départements d'Outre-Mer. ISSN 0534-0713. 213p.

Coyne, D., Wasukira, A., Dusabe, J., Rotifa, I., Dubois, T., 2010. Boiling water treatment: A simple, rapid and effective technique for nematode and banana weevil management in banana and plantain (Musa spp.) planting material Crop Protection 29 (12), 1478-1482.

Dabin, B., 1963. Méthode Olsen modifiée. Cah. O.R.S.T.-O.M., sér. Pédol., Vol, n°3: 278-286.

Dallot, S., Acuña, P., Rivera, C., Ramírez, P., Côte, F., Lockhart, B.E.L., Caruana, M - L. 2001. Evidence that the proliferation stage of micropropagation procedure is determinant in the expression of Banana streak virus integrated into the genome of the FHIA 21 hybrid (*Musa* AAAB). Arch. Virol. 146, 2179 – 2190.

Daudin, D., Sierra, J., 2008. Spatial and temporal variation of below-ground N transfer from a leguminous tree to an associated grass in an agroforestry system. Agriculture, Ecosystems and Environment 126, 275–280.

de Ruiter, P. C., Neutel, A.M., Moore, J.C., 1998. Biodiversity in soil ecosystems : the role of energy flow and community stability. Applied Soil Ecology **10**: 217-228.

De Waele, D., Davide, R. G., 1998. Nématodes à Galle des bananiers et plantains, Parasites et ravageurs des Musa : fiche technique n°3, INIBAP 2p.<URL : > http://bananas.bioversityinternational.org/files/files/pdf/publications/Pest3fr.pdf.

Debaeke, P., Petit, M.-S., Bertrand, M., Mischler, P., Munier-Jolain, N., Nolot, J.-M., Reau, R., Verjux, N., 2008. Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes? Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp 149-168.

Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.-M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 73-86.

Decaens, T., Galvis, J.H., Amezquita, E., 2001. Propriétés des structures produites par les ingénieurs écologiques à la surface du sol d'une savane colombienne. *Life sciences* 324. pp 465-478.

Delvaux G., Lassoudière A., Perrier X. et Marchal J., 1986. Une méthode d'étude des relations sol-plante-techniques culturales par enquête diagnostic. Application à la culture bananière au Cameroun. Synthèse des résultats. Fruits 41 (6), 359-370.

Delvaux, B., 1995. Soils. In « Bananas and Plantains », Gowen, S.R., (Ed.), Chapman and Hall, London, 230-257.

Delvaux, B., Guyot, Ph., 1989. Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. Fruits 44 (12), 663-647.

Diekmann, M., Putter, C.A.J., 1996. Technical Guidelines for the Safe Movement of Germplasm 15, 26p. FAO/IPGRI, Rome.

Dinham B., Malik S., 2003. Pesticides and humain rights. Internationnal Journal of Occupational and Environnmental Health 9, 40-52.

Djigal, D., Chabrier, C., Tixier, P., Duyck, P.F., Achard, R., Quénéhervé, P., 2012. Cover crops alter the soil nematode food web in banana agroecosystems. Soil Biology & Biochemistry 48, 142-150.

Djigal, D., Saj, S., Rabary, B., Blanchart, E., Villenave, C., 2012. Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. Soil and Tillage Research 118, 11-21.

Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J., (éds), 2006. L'agronomie aujourd'hui, Editions Quae, 367 p.

Dorel, M., Perrier, X., 1990. Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe, Enquête diagnostic, Fruits, vol. 45, n°3. pp. 237-245.

Dorel M., 1993. Travail du sol en bananeraie : cas des andosols. *Fruits* 1993 ; 48 : 77-82. **Dorel, M., 1993**. Développement du bananierr dans un andosol de Guadeloupe : effet de lacompacité du sol. Fruits. 48 :2, 83-88.

Dorel, M., Lafforgues, A., Bretaud, P., et Breton, M., 1996. Etude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. Cirad-Flhor, Guadeloupe. 27 p

Dorel, M., Lombard, K., Oliver, R., 2005. Azote minéralisable et statut organique des andosols de la Guadeloupe : Influence du milieu et de pratiques culturales. Etude et Gestion des Sols, Vulme 12, 267-280.

Dorel M., Tixier P., Dural D., Zanoletti S., 2011. Alternatives aux intrants chimiques en culture bananière. Innovations Agronomiques 16, 1-11.

Doube, B.M., Schmidt, O., 1997. Can the abundance or activity of soil macrofauna be used to indicate the biological health of soils. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R (Eds.), Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, pp. 265–295.

Draye, X., Lecompte, F., Pages, L., 2005. Distribution of banana roots in time and space : new tools for an old science. In : Turner, D.W., Rosales, F.E., (Eds.), Banana System : Towards a Better Understanding for its Productive Management. Proceedings of the

International Symposium. San Jose, Costa Rica, November 3-5, 2003, INIBAP, Montpellier, pp. 58-74.

Duby, C., Robin, S., 2000. Analyse en composante pricipale. INRA, Paris-Grignon.

Ducharme, E.P., 1955. Sub-soil drainage as a factor in the spread of the burrowing nematode. P. FL. St, Hortic. SOC. 68, 29-31.

Duponnois R, Colombet A, Hien V, Thioulouse J 2005a. The mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and rock phosphate amendement influence plant growth and microbial activity in the rhizosphere of *Acacia holosericea*. Article sous presse.

Duponnois, R., BÂ, A.M., Prim, Y., Baudouin, E., Galiana, A., Dreyfus, B., 2010. Les champignons mycorhiziens : une composante majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux : le projet majeur africain de la Grande Muraille verte, 421-440.

DuPont, S.T., Ferris, H., Van Horn, M., 2009. Effects of cover crop quality and quantity on nematode-based soil food webs and nutrient cycling. Applied Soil Ecology **41**: 157-167.

Duyck, P.F., Dortel, E., Tixier, P., Vinatier, F., Loubana, P.M., Chabrier, C., Quénéhervé, P., 2012. Niche partitioning based on soil type and climate at the landscape scale in a community of plant-feeding nematodes. Soil Biology and Biochemistry 44, 49-55.

Edwards, C.A., 1988. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. Agric. Ecosyst. Env. 24, p. 21-31.

Endo, B.Y., 1959. Responses of root-lesion nematodes, *Pratylenchus brachyurus* and *P. zeae*, to various plants and soil types. Phytopathology, 49:417-421.

Ettema, C.H., Wardle, D.A., 2002. Spatial soil ecology. Trends in Ecology and Evolution **17**: 177-183.

FAOSTAT, 2008. Food and agriculture Organisation of United Nations, Rome. www.fao.org.

FAOSTAT, 2014. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. www.fao.org. http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E.

Feldmesser, J., Feder, W.A., Rebois, R.V., Hutchins, P.C., 1960. Longevity of Radopholus similis and *Pratylenchus* brachyurus in fallow soil in the greenhouse. Anat. Rec. 137, 335.

Feller C, Albrecht A., Brossard, M., Chotte, 1.-L., Cadet p., 1990, Effet de diftërent systémes de culture paysans sur quelques propriétés des sol et relation solplante dans la zone des Petites Antilles, *Agricu/ture Paysanne et Déve/oppement :Caraibes-Amérique tropica/ 3* : 165-195.

Ferron, P., 1999. Protection intégrée des cultures : évolution du concept et de son application. In A. Fraval et C. Silvy : La lutte biologique (II). Dossiers de l'environnement de l'INRA. 19 p.

Fitter, A., 1996. Characteristics and functions of root systems. In : Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi (Eds) Plant roots. The hidden half. Marcel Dekker Inc., New York, USA, pp. 1-20.

Floret, C., 1998. Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique centrale (Cameroun) et en Afrique de l'ouest (Mali, Sénégal). Rapport final.

Fogain, R., 2001. Nematodes and weevil of bananas and plantains in Cameroon: occurrence, importance and host susceptibility. International Journal of Pest Management 47(3): 201-205.

Forite, C., 2011. Diagnostic agroécologique de plantations de bananes plantains en Guadeloupe. Mémoire de fin d'études- Master - ISTOM : 42-44 p.

Fortin, J.A., Plenchette, C., Piché, Y., 2008. Les Mycorhizes. La nouvelle révolution verte. Editions Multimondes et Quae, 131 p.

Fraser, P.M., Williams, P.H., Haynes, R.J., 1996. Earthworm species, population size and biomass under different cropping systems across the Canterbury Plains, New Zealand. Appl. Soil Ecol. 3, 49-57.

Fréguin S., 2005. Chronique d'une crise agraire annoncée. Etude comparée des transformations des systèmes agraires et des dynamiques d'échanges transfrontaliers entre Haïti et la République Dominicaine – le cas de la banane plantain. Thèse de doctorat – In : UER Agriculture comparée et développement rural, INA P-G, Paris : 394 p.

Frison, E.A., Gold, C.S., Karamura, E.B., Sikora, R.A., 1998. Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa : Proceedings of a workshop on banana IPM held in Nelspruit, South Africa, 23-28.

Frogatt, J.L., 1925. The banana weevil borer (Cosmopolites sordidus). Queensland journal of Agriculture 24 : 558.

Fu, S., Coleman, D.C., Hendrix P.F., Crossley, Jr.D.A., 2000. Responses of trophic groups of soil nematodes to residue application under conventional tillage and no-till regimes. Soil Biol. Biochem. 32, pp. 1731-1741.

Gaidashova, S.V., Gatarayiha, C.M., Uwimpuhwe, B., 2004b. Effect of clean planting material on agronomic parameters and nematode damage. In : Abstract guide. 1st International Congress on Musa: harnessing research to improve livelihoods. 6-9 July 2004, Penang, Malaysia, pp. 193-194.

Ganry, J., 2001. Maîtrise de la culture bananière pour une production raisonnée face aux nouveaux défis. Comptes rendus d'Académie d'Agriculture de France. 87 : 6, 119-127

Ganry, J., 2004. Diversité spécifique des peuplements végétaux à l'échelle du bassin versant et contrôle des parasites des cultures : l'exemple de la culture bananière aux Antilles françaises. C.R. Biologies 327, 621-627.

Gayral, P., Iskra- Caruana, M.L., 2009. Phylogeny of Banana streak virus reveals recent and repetitive endogenization in the genome of its banana host (Musa sp.). J. Mol. Evol.69:65–80.

Gayral, P., Noa-Carrazana, J.C., Lescot, M., Lheureux, F., Lockhart, B.E.L., Matsumoto, T., Piffanelli, P., Iskra-Caruana, M.L., 2008. A single banana streak virus integration event in the banana genome as the origin of infectious endogenous pararetrovirus. J. Virol. 82:6697–6710.

Geissen, V., Morales, G., 2006. Fertility of tropical soils under different land use systems – a case study of soils in Tabasco, Mexico. Applied Soil Ecology, volume 31, 169-178.

Gianinazzi, S., Schüepp, H., 1994. Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems. Advances in Life Sciences. Birkhäuser, Basel.

Gnonhouri, P., Adiko, A., 2005. Résultats des prospections nématologiques réalisées en culture de banane de dessert en Côte d'Ivoire : Projet CORUS-NEMATOLOGIQUE, rapport de la première étape : 4-7.

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W.,2003. Le sol vivant,Ed. Lausanne ISB, 568p.

Godefroy J., 1969. Le développement des racines du bananier dans divers sols : relation avec la fertilité. Fruits 24 (2). 101-104.

Gold, C. S., Pena, J. E. & Karamura, E. B., 2001. Biology and integrated pest management for the banana weevil Cosmopolites sordidus (Germar) (Coleoptera: Curculionidae). Integrated Pest Management Reviews, 6, 79-155.

Gousseland, J., 1983. Étude de l'enracinement et de l'émission racinaire du bananier 'Giant Cavendish' (Musa acuminata AAA, sous -groupe Cavendish) dans les andosols de la Guadeloupe. Fruits 38: 611-623.

Gowen, S., et Quénéhervé, P., 1990. Nématode parasites of bananas, plantains and acaba. In : M. Luc, A. Sikora and J. Bridge (Editors), *Plant parasitic nématodes in subtropical agriculture*. CAB International, 431-460.

Gowen, S.R., Quénéhervé, P., Fogain, R., 2005. Nematodes parasites of bananas and plantains. In: Luc, M., Sikora, R.A., Bridge, J. (Eds.), Plant parasitic nematodes in subtropical and Tropical Agriculture, 2nd ed. CABI Publishing, Wallingford, pp. 611–643.

Grenelle, 2008. Loi de Grenelle de l'environnement. Available on : http://droitnature.free.fr/Shtml/LoiGrenelleI.shtml.

Griffon, M., 2003. Développement durable ensemble ?

Guillemin, J.P., Gianinazzi, S., Trouvelot, A., 1992. Screening of arbuscular endomycorrhizal fungi for establishment of micropropagated pineapple plants. *Agronomie, 12* (10), 831-836. http://prodinra.inra.fr/record/110140.

Haynes, R. J., Swift, R. S., Stephen, R.C., 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, stable aggregation and clod porosity in a group of soils. Soil and Tillage Research, 19, 77-87.

Haynes, R.J., 1999. Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. Biol. Fertil. Soils 30, 210–216.

Haynes, R.J, 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. Soil Biology & Biochemistry 32, 211-219.

Hindell, R.P., McKenzie, B.M., Tisdall, J.M., 1997. Destabilization of soil during the production of earthworm (Lumbricidae) and artificial casts, Biol. Fertil. Soils 24, 153–163.

Hindell, R.P., McKenzie, B.M., Tisdall, J.M., 1997. Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworm (Lumbricidae) casts, Biol. Fertil.Soils 25, 27–35.

Hodge, A., Campbell, C.D., Fitter, A.H., 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. Nature 413, 297-299.

Hoitink, H.A.J., Fahy, P.C., 1986. Basis for the control of soilborne plant pathogens with composts. Annu. Rev. Phytopathol. 24, 93–114.

Hollis, J.P., Rodriguez-Kabana, R., 1966. Rapid kill of nematodes in flooded soil. Phytopathology. 56, 1015-1 1019.

Hooper, D.J., 1986. Extraction of free-living stages from soil. In: Southey, J.F.(Ed.), Laboratory Methods for Work with Plant and Soil Nematodes. Sixth ed. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, pp. 5–30.

Horrigan, L., Lawrence, R.S., Walker, P., 2002. How Sustainable Agriculture Can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. Environmental health perspectives volume 110 |number| 5 p 445-456.

Houdart, M., Bonin, M., Temple, L., 2009. Dynamique d'acteurs (agriculteurs et institutions) et innovation agro-écologique pour la gestion des risques environnementaux en Guadeloupe. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement 9.

Hugon, R., Picard, H., 1988. Relation spatiale entre taches et nécroses racinaires et nématodes endoparasites chez le bananier. Fruits 43 (9), 491-498.

Infomusa, 2001. Réseau international pour l'amélioration de la banane et de la banane plantain. INIBAP Vol. 10 n° 2, 68 p. http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Infomusa__La_revue_internationale_sur_bananiers_et_plantains_973.pdf.

Infomusa, 2003. International Network for the Improvement of Banana and Plantain, (INIBAP), Montpellier (France). Vol. 12 n° 1, 58 p. http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Infomusa__La_revue_internationale_sur_bananiers_et_plantains_1106.pdf.

INIBAP, 1999. Networking Banana and Plantain: INIBAP Annual Report 1998. International Network for the Improvement of Banana and Plantain, Montpellier, France.

INRA Magazine N° 22, - octobre 2012. Les champs du possible, 33p**.**

Iskra−Caruana, M−L., Baurens, F−C., Gayral, P., Chabannes, M., 2010. A four– partner plant–virus interaction: enemies can also come from within. MPMI. 23:1394–1402.

Jackson, L., van Noordwijk, M., Bengtsson, J., Foster, W., Lipper, L., Said, M., Snaddon, J, Vodouhe, R., 2010. Biodiversity and agricultural sustainagility: from assessment to adaptive management. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2: 80-87.

Jackson, T.L., Vacharotoyan, S., Alban, L.A., Peterson, R., 1964. Assimilabilité du phosphore dans les sols bruns rouges latéritiques 1ère partie- Relations entre les essais aux champs, en serres, et les analyses de sol 2ème partie. Agronomy Journal –Vol 56 (6), 555-560.

Jacq V.A., Fortuner, R., 1978.La diminution du nombre de nématodes parasites du bananier lors d'une submersion accidentelle : une conséquence d'une sulfatoréduction bactérienne ? Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 64, 1248-17152.

Jacq, V.A., Fortuner, R., 1979. BioIogical control of ice nematodes using sulfate reducing bacteria. Revue de Nématologie, 2. 41-50.

Jalonen, R., Nygren, P., Sierra, J. 2009. Transfer of nitrogen from a tropical legume tree to an associated fodder grass via root exudation and common mycelial networks. Plant, Cell and Environment 32:1366-1376.

Javed, N., Gowen, S.R., El-Hassan, S.A., Inam-ul-Haq, M., Shahina, F., Pembroke, B., 2008. Effecacy of neem (Azadirachta indica) formulations on biology of root-knot nematodes (Meloidogyne javanica) on tomato. Crop Protection 27, 36-43.

Johnson, L.F., 1974. Extraction of oat straw, flax, and amended soil to detect substances toxic to the root-knot nematode. Phytopathology 64:1471-1473.

Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* **69,**101-110.

Jones, C. G., Lawron, J. H., Shachak, M., 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. Ecology **78**(7) : 1946-1957.

Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., Lepage, M., 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers : intended and accidental effects on soil and feedback loops. Applied Soil Ecolology 32, 153-164.

Keetch, D.P., Reynolds, R.E., Mitchell, J.A., 1975. The survival and vertical distribution of the burrowing eelworm in Natal banana soils. Citriu and Subtropical Fruit Journal, 493, 15-1 I.

Kermarrec, A., 1979. Niveau actuel de la contanimation des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds. INRA Guadeloupe/Ministère de l'Agriculture. 155p.

King, R. A., Read, D. S., Traugott, M., Symondson, W. O. C., 2008 Molecular analysis of predation: a review of best practice for DNA-based approaches. Molecular Ecology,17, 947-963.

Kladivko, E. J., 2001. Tillage systems and soil ecology. Soil and Tillage Research **61**: 61-76.

Koenning, S.R., D.P. Schmitt et K.R. Barker. 1985. Influence of selected cultural practices on winter survival of *Pratylenchus brachyurus* and subsequent effects on soybean yield. Journal of Nematology, 17(4) : 464-469.

Kone, D., Gnonhouri, P., Kone, D., Ake, S., Traore, S., 2010. Interactions entre deux nématodes endoparasites migrateurs Radopholus similis et *Pratylenchus* coffeae sur le développement de vitroplants du bananier Musa (AAA) cv « Williams. Contribution of agriculture to achieving MDGs, 87-98. Publishing online at http://www.m.elewa.org.

Kopenhofer, A.M., 1993. Observations on egg-laying behavior of the banana weevil, Cosmopolites sordidus (Germar). Entomologia Experimentalis et Aplicata 68: 187-192.

Kopenhofer, A.M., Seshu-Reddy, K.V., Sikora, R.A., 1994. Reduction of banana weevil populations with pseudostem traps. International Journal of Pest Management 40, 300-304.

Kwa, M., 2002. New Horticultural Techniques of Mass Production of Bananas: the PIF Technique. CARBAP Technical Data Sheet. CARBAP, Montpellier.

Kwa M., 2003. Activation de bourgeaons latents et utilisation de fragments de tige du bananier pour la propagation en masse de plants en conditions horticoles in vovo. Fruits 58, 315-328.

L'Etang M, 2012. *A*nalyse de l'effet des conditions biotiques et abiotiques sur le déterminisme biochimique d'exudats racinaires de Crotalaria spp : Application à la nématorégulation en production végétale. Thèse de doctorat. UAG-UR1321, ASTRO-INRA des Antilles-Guyane. 165 p.

Lacher T. E., Goldstein M. l., 1997. Tropical ecotoxicology : Status and needs. Environmental Toxicology and Chemistry 16:100-111.

Lacoeuilhe, J. J., 1996. Petit glossaire discute. 4p.

Lafont, A., Risede, J.M., Loranger-Merciris, G., Clermont-Dauphin, C., Dorel, M., Rhino, B., Lavelle, P., 2007. Effects of the earthworm Pontoscolex corethrurus on banana plants infected or not with the plant-parasitic nematode Radopholus similis. *Pedobiologia*, 51, 311-318.

Lamandé, M., Pérès, G., Hallaire, V., Curmi, P., Cluzeau, D., 2004. Action combinée des pratiques culturales et des lombriciens sur le sol Morphologie porale, conductivité

hydraulique et communautés lombriciennes suivant trois systèmes de culture. *Étude et Gestion des Sols, Volume 11, 4, 2004 - pages 393 à 402.*

Lambers, H., Chapin, F.S., Pons, T.L., 2008. Plant physiological ecology. 2nd ed. Springer, Berlin.

Lançon, J., Reau, R., Cariolle, M., Munier-Jolain, N., Omon, B., Petit, M.S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. In : R. Reau et T. Doré (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer. Paris, Educagri Editions, pp 91-107.

Lassoudière, A., 1978a. Le bananier et sa culture en Côte d'Ivoire. Connaissance de la plante, interaction avec le milieu écologique. Document IRFA.104 p.

Lassoudière, A., 1985. Lutte contre les nématodes du bananier au Cameroun.Réunion annuelle IRFA. - France : CIRAD-IRFA, n°13, 23 p.

Lassoudière, A., 2007. Le bananier et sa culture. Collection Savoir Aire, Editions Quae, 384p

Lassoudière, A., 2011. Le bananier, un enjeu mondial. Pour la Science n° 400, février 2011.

Lavelle P., 1997. Faunal activities and soil processes : adaptive strategies that determine ecosystem function. Advances in Ecological Research 27 : 93-132.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage M. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem enginners. Eur. J. Soil. Biol. 33(4): 159-193.

Lavelle, P., Spain, A.V., 2001. Soil Ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 654 p.

Lavelle, P., 2002. Functional domains in soils. Ecological Research (17): 442-443.

Lavelle, P., Blouïng, M., Boyer, J., 2004. Plant parasite control and soil fauna diversity. C. R. Biologies 327: 629-638.

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. European Journal of Soil Biology 42 : S3-S15.

Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., M.T., (Eds.), 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 113 p.

Lefranc L.M., L. Temple, C. Staver, M. Kwa, T. Lescot, I. Michel & I. Nkapnang, 2010: Conditions of adoption of new technique of vegetative multiplication (PIF) in Cameroon: impact on the diffusion of new banana and plantain cultivars. In: Dubois T., S Hauser, C. Staver & D.Coyne (eds): *Harnessing International Partnerships to increase Research Impact*, ISHS, Montpellier, pp 727-733.

Lemaire, L., 1996. Les relations sémiochimiques chez le charançon du bananier Cosmopolites sordidus Germar (Coleoptera: Curculionidae) et la résistance de sa plante-

hôte, le bananier, Académie du Languedoc. Université de Montpellier II, Montpellier, p. 269 pp.

Lescot T., 1995. « Culture de la banane plantain et durabilité des systèmes de productions ». P419-426 In : Fertilité du milieu et stratégie paysannes sous les tropiques humides. CIRAD, Ministère de la coopération. Acte du séminaire 13-17 Novembre 1995. Montpelier, France.

Lescot, T.; N'Guyen, F., 1998. La banane plantain en Haïti : une filiere en difficulte Montpellier, France : INIBAP, 1999 p.311-325 In : International Symposium On Bananas And Food Securite Alimentaire, 1998, Douala, Cameroon. Les productions bananieres : un enjou economique majuer pour la securite alimentaire. Proceedings. Montpellier, France: INIBAP, 1999-779 p.

Lescot, T., 2006. La banane en chiffres. Le fruit préféré de la planète. Fruit Trop., 140 : 5-9.

Lescot, T., 2008. Genetic diversity of banana in figures. Fruitrop 155, 29-33.

Loos, C.A., 1961. Eradication of the burrowing nematode, Radopholus similis , from bananas. Plant Dis. Rep. 45, 457–461.

Loranger-Merciris, G., Cabidoche, Y.-M., Deloné, B., Quénéhervé, P., Ozier-Lafontaine, H., 2012. How earthworm activities affect banana plant response to nematodes parasitism. Applied Soil Ecology, 52: 1-8.

Loridat Ph., 1989. Etude de la microflore fongique et des nématodes associés aux nécroses de l'appareil souterrain du bananier en Martinique. Mise en évidence du pouvoir pathogène du genre Cylindrocladium. Fruits 44 (1), 587-598.

Lossois P., 1963. Le mécanisme des essais sol-plante. Dans : Journées d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales. Fruits 18 (10), 462-463.

Loyce, C., Meynard J.M., Bouchard, C., Roland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernico,t M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, yield and profitabiity. Crop Protection 27, 1131-1142.

Lumsden, R.D., Lewis, J.A., Millner, P.D., 1983. Effect of composted sewage sludge on several soilborne pathogens and diseases. Phytopathology 73: 1543–1548.

Maas, P.W.T., 1969. Two important cases of nematode infestation in Surinam. In Nematodes of tropical crops. Ed. Peachey (J.E.) Commonwealth Bureau, Helminthological Technical Communication, N° 40, 149-154.

Marie, P., Dave, B., Cote, F., 1993. Utilisation des vitroplants de bananiers aux Antilles Françaises : atouts et contraintes. *Fruits* 48 : 89-94.

Marinissen, J.C.Y., Dexter, A.R., 1990. Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. Biol. Fert. Soils 9, 163–167.

Maroni M, Fanetti AC, Metruccio F. 2006. Risk assessment and management of occupational exposure to pesticides in agriculture. Med Lav 97:430–437.

Mateille, T., Foncelle, B., 1988. Micropropagation of Musa AAA cv. 'Poyo' in the Ivory Coast. Tropical Agriculture. 65, 325-328.

Mateille, T., Foncelle, B., Ferrer, H., 1988. Lutte contre les nématodes du bananier par submersion du sol. Revue de nématologie , 11, 235-238.

Mateille, T., Adjovi, T., Hugon, R., 1992. Techniques culturales pour la lutte contre les nématodes du bananier e122n Côte d'Ivoire : Assainissement des sols et utilisation de matériel sain. Fruits. 47(2), 281-290.

Mays, D.A., Giordano, D.M., 1989. Land spreading municipal waste compost. Biocycle 30, 37–39.

McIntyre B.D., Speijer P.R., Riha S.J., and Kizito F., 2000. Effects of mulching on biomass, nutrients, and soil water in banana inoculated with nematodes. Agronomical Journal 92, 1081-1085.

Mehta, C.M., Uma Palni, Franke-Whittle, I.H., Sharma, A.K., 2014. Compost: Its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant Diseases. Waste Management 34, 607–622.

Merwin, I.A., W.C. Stiles. 1989. Root-lesion nematodes, potassium deficiency, and prior cover crops as factors in apple replant disease. Journal of the American Horticultural Society, 114(5):724-728.

Meynard, J.M., Girardin, P., 1991. Produire autrement. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, 15, 1-19.

Meynard, J.M., David, G., 1992. Diagnostic sur l'élaboration du rendement des cultures, Cahiers Agricultures , 1, 1, 9-19.

Meynard, J.M., Doré, T., et Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable, *Acad. Agric. Fr.* 87, 223–236.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystem and Human Well-Being: Synthesis, Island Press, 137 p.

Miller, P., Turner, N., Tomlinson, H., 1973. Toxicity of leaf and stem extracts to Tylenchorhynchus dubius. J. Nematol. 5, 173.

Ministère de l'Agriculture et dela Pêche, 2008. Ecophyto 2018, 19 p.

Minton, N.A. et M.B. Parker. 1987. Root-knot nematode management and yield of soybean as affected by winter cover crops, tillage systems, and nematicides. Journal of Nematology, 19(1):38-43.

Minz, G., Ziv, D., and Strich-Harari, D., 1960. Decline of banana plantations caused by spiral nematodes, in the Jordan valley, and its control by DBCP. Ktavim Rehovot, 10, 147-157.

Mischler, P.H., Hocdé, B., Triomphe, B. Omont, 2008. Conception de Systèmes de Culture et de Production avec des Agriculteurs : Partager les Connaissances et les Compétences pour Innover . In: R. Réau and T. Doré (coords.): *Systèmes de culture innovants et durables. quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer.?* Editions Educagri, Dijon, pp 71-89.

Moens, T., Araya, M., Swennen, R., Waele, D., 2006. Reproduction and pathogenicity of Helicotylenchus multicinctus , Meloidogyne incognita and *Pratylenchus* coffeae, and their interaction with Radopholus similis on Musa. Nematology 8, 45–58.

Moonen, A.C., Bàrberi, P., 2008. Functional biodiversity: An agroecosystem approach. Agriculture, Ecosystems and Environment. 127: 7-21.

Mosse, B., 1956. Fructifications of an Endogone species causing endotrophic mycorrhiza in fruit plants. Ann Bot 20:349–362.

Musabyimana, T., Saxena, R.C., 1999. Efficacy of neem seed derivatives against nematodes affecting banana. Phytoparasitica 27, 43-49.

Nath, G., Singh, K., 2011. Combination of vermicomposts and biopesticides against nematode (*Pratylenchus* sp.) And their effect on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*).IIOABJ; Vol. 2; Issue 5; 2011:27–35.

Ngo-Samnick, E. L., 2011. Production amélioirée de la banana plantain. 24p. http://www.isf-cameroun.org/sites/default/files/bananier%20fran%C3%A7ais%20-%20site.pdf.

Noble, R., Coventry, E., 2005. Suppression of soil-borne plant diseases with composts, a review. Biocontrol Sci. Technol. 15, 3–20.

Ogisma, A., 2011. Diagnostic agri-environnemental en exploitations de banane plantain en Guadeloupe : logiques décisionnelles, performances productives et agro écologiques des pratiques associées. Mémoire de fin d'études- UAG, 40 p.

Okech S.H., Gaidashova S.V., Gold, C.S., Gatarayiha C., Ragama P., 2002. Banana pests and disease in Rwanda : Observations from a Participatory Rural Appraisal and a Diagnostic Survey. In : Proceedings of Integrated Pest Management symposium, 8-12 September 2002, Kampala, Uganda. Akipala et al. (Eds), NARO/Makerere University, Kampala, pp. 162-170.

Olvera-Velona, A., Benoit, P., Capowiez, Y., Charnay, M.P., et Barriuso, E., 2003. Disponibilité d'insecticides organophosphosrés dans les sols agricoles du Mexique et impacts écotoxicologiques sur les vers de terre (A. Caliginosa). Actes des 2èmes rencontres de l'INRA 4 avril 2003. 2 p.

Oostendorp, M., Dickson, D.W., Mitchell, D.J., 1991. Population development of *Pasteuria penetrans* on *Meloidogyne arenaria*. Journal of Nematology, 23(1):58-64.

Ortiz, S.M., Anaya, G., Estrada, B.W., 1994. Evaluacion, cartografia y politicas preventivas de la degradacion de la tierra. Chapingo : Colegio de Postgraduados, 161 p.

Padmanaban, B., Sathiamoorthy, S., 2001. Le charançon du Pseudotronc du bananier Odoiporus longidorus. INIBAP. Parasites et ravageurs des Musa-fiche technique 5.

Paoletti, M.G., 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. Agric. Ecosystem. Environ. 74, 137-155.

Pattison, A. B., Moody, P. W., Badcock, K. A., Smith, L. J., Armour, J. A., Rasiah, V., Cobon, J. A., Gulino, L.-M., Mayer, R., 2008. Development of key soil health indicators for the Australian banana industry. Applied Soil Ecology **40:** 155-164.

Perrieux, X., Delvaux, B., 1991. Une méthodologie de détection et de hiérarchie des facteurs limitant la production à l'échelle régionale. Application à la culture bananière. Fruits 46 (3), 213-226.

Pierrot, J., Achard, R., Temple, L., Abadie, C., Fogain, R., 2002. Déterminants de la production de plantain dans le sud-ouest du Cameroun : intérêt d'un observatoire. Fruits, 57, pp 75-86.

Pinochet, J., Rowe, P.R., 1979. Progress in breeding for resistance to Radopholus similis on bananas, Nematropica. Florida, 9: 76-78.

Polidoro, B.A., Dahlquist, R.M., Castillo, L.E., Morra, M.J., Somarriba, E.,. Bosque-Pérez , N.A., 2008. Pesticide application practices, pest Knowledge, and cost-benefits of plantain production in the Bribri-Cabécar Indigenous Territories, Costa Rica. Environnemental Research 108, 98-106.

Ponge, J.F., 1999. Horizons and humus forms in beech forests of the Belgian Ardennes. Soil Science Society of America Journal 63, 1888–1901.

Ponge J. F. 2000. Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré. Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France 86, 8 : 129-135.

Quénéhervé, P., 1990. Spatial arrangement of nematodes around the banana plant in the Ivory Coast: related comments on the interaction among concomitant phytophageous nematodes. Acta OEcologica, 11 : 6, 875-886.

Quénéhervé P., 1998, Les nématodes de l'igname, Cigname : Plante séculaire et culture d'avenir (1. Berthaud, N. Bricas et 1.-L. Marchand éd.), Actes du séminaire international CIRAD-INRA-ORSTOM-CORAF (3-6 juin 1997, Montpellier), pp. 193-204.

Quénéhervé, P., Dao, Jc, Ducelier, D., 2005. Agriculture biologique en Martinique : Chapitre 4 - Faisabilité technique de l'agriculture biologique à la Martinique: productions. IRD éditions pp 149-151 <URL : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-04/010035424.pdf>.

Quénéhervé, P., Van Den Berg, E., 2005. Liste des nématodes phytoparasites (Nematoda : Tylenchida et Dorylaimida) des départements français d'Amérique : Guadeloupe, Martinique et Guyane. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 35, 519-530.

Quénéhervé P, Chabrier C, Auwerkerken A, Topart P, Martiny B, Marie-Luce S., 2006. Status of weeds as reservoirs of plant-parasitic nematodes in banana fields in Martinique. Crop Protection 25: 860-867.

Quénéhervé, P., Marie-Luce, S., Barout, B., Grosdemange, F., 2006. Une technique de criblage variétal précoce des bananiers contre les nématodes phytoparasites. Nematology 8: 147-152.

Quénéhervé, P., Salmon, F., Topart, P., Horry, J.-P., 2008. Nematode Resistance in Bananas: screening results on some new Mycosphaerella resistant banana hybrids. Euphytica, in press.

Quénéhervé, P., Barrière, V., Salmon, F., Houdin, F., Achard, R., Gertrude, J.C., Marie-Luce, S., Chabrier, C., Duyck, P.F., Tixier, P., 2011. Effect of banana crop mixtures on the plant-feeding nematode community. Appl. Soil Ecol. 49, 40-45.

Rajendran, G., Naganathan, T.G., Vadivelu, S., 1979. Studies on banana nematodes. Indian Journal of Nematology, 9, 54.

Ramaël, D., 2012, Diagnostic agro-écologique de la culture du bananier plantain en Guadeloupe : effet des systèmes de culture et des itinéraires techniques sur l'état biologique et chimique des sols des plantations, U.A.G., Rapport Master 2 ECOTROP.

Reau, R., Doré, T., 2008. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri Dijon, France. 175 p.

Rhino, B., Dorel, M., Tixier, P. & Risède, J.-M., 2010. Effect of fallows on population dynamics of Cosmopolites sordidus : toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. Agricultural and Forest Entomology.

Rhino, B., Dorel, M., Tixier, P., Risede, J.M., 2010. Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus* : toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. Agricultural and Forest Entomology 12: 195-202.

Rhodes, L.H., Gerdemann, J.W., 1975. Phosphate uptake zones of mycorrhizal and non mycorrhizal onions. *New Phytologist, 75, 555-561*.

Richard T.L., Hamelers H.V.M., Veeken A., Silvia T., 2002. Moisture relationship in composting process. Compost Sci. Util,10(4), 286-302.

Rodríguez-Romero, A.S., Azcón, R., Jaizme-Vega, M.D.C., 2011. Early mycorrhization of two tropical crops, papaya (*Carica papaya* L.) and pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr.], reduces the necessity of P fertilization during the nursery stage. *Fruits,* 2011, vol. 66, p. 3–10.

Rosales, F.E., Ramiro, J., 2004. Quakity of life in the banana rhizosphere : a vision of new initiatives in latin America. In : Orozo-Santos, M., et al. (Eds.), Proceedings of the XVI International Meeting of ACORBAT. 26 September-1 October, Oxana, Mexico, PP. 131-142.

Rosales, F.E., Alvarez, JM, Vargas, A., 2010. Guide pratique pour la production de bananes plantains sous haute densité de plantation - Retours d'expériences d'Amérique latine et des Caraïbes (Rosales FE, éd.). Bioversity International, Montpellier, France : 23-25.

Rosset, P.M., Altieri, M.A., 1997. Agroecology versus input substitution: a fundamental contradiction of sustainable agriculture. Society & Natural Resources 10(3): 283-295.

Rowe, P., Rosales, F., 1993. Amélioration de diploïdes à la FHIA et création de la variété Gold-finger (FHIA-01), Infomusa 2 (1993) 9–11.

Salas, J.A., Oyuela, R., Stover, R.H., 1976. Effect of fallow on the burrowing nematode (Radopholus similis) of bananas. Plant Dis. Rep. 60 (10), 863–866.

Sánchez Rodríguez R., Pino Algora J.A., Vallin Plous C., Pérez Rodríguez M.E., Iznaga Sosa Y., Malpartida Romero F.. 2002. Action du fongicide naturel F20 contre la cercosporiose noire (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) chez le bananier plantain (AAB) et le bananier (AAA). Infomusa_ vo1, n°1 :14-16.

Sarah, J.A., Lassoudière, A. and Guerout, R., 1963. La jachère nue et l'immersion du sol : deux méthodes intéressantes de lutte intégrée contre Radopholus similis (Cobb) dans les bananeraies de sol tourbeux de Côte d'Ivoire. Fruits, 38 (1), 45-42.

Sarah, J.L. 1989. Nematological review - banana nematodes and their control in Africa. *Nematropica*, 19: 199-216.

Sarah, J.L., 1999. Nematodes pathogens. In Diseases of Banana, Abaca and Enset.Jones ed.

Sarah, J.L., Hugon, R., Simon, S., 1990. The banana mosaic disease. Fruits (spécial Issue on Bananas) : 50-55.

Searle, P.L., 1984. The Berthelot or indophenols reaction and its use the analytical chemistry of nitrogen. A review. Analyst (London) 109 : 549-568.

Sebillotte, M., 1974. Agronomie et agriculture, essai d'analyse des tâches de l'agronome, Cahiers Orstom, Série Biologie 24, 3-25.

Sebillotte M., 1978. La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. In J. Boiffin, P. Huet & M. Sebillotte : *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?* Ed. INA-PG, Paris, 466-496.

Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les Agronomes. In Combe L., Picard D. (Eds.). Le point sur les systèmes de culture, INRA Editions, Paris, PP.165-196.

Sébillotte, M., 1993. L'agronome face à la notion de fertilité. *Natures - Sciences - Sociétés* ; 1 : 128-41.

Seinhorst, J.W.,1950. De betekenis van de toestand van de grond voor het optreden van aanstasting door het stengelaattje (Ditylenchus dipsaci)(Kühn) Filipjev). Tijdschr. Plantenziek 5, 291-349.

Seinhorst, J.W., 1956. The quantitative extraction of nematodes from soil. Nematologica, 1, 249-128.

Seinhorst, J.W., 1962. Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soil. Nematologica, 8, 117-128.

Selosse, M.A, Baudoin, E, Vandenkoornhuyse, P, 2004. Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants C. R. Biologies 327 (2004) 639–648.

Selosse, M.-A., Gilbert, A,.2011. Des champignons qui dopent les plantes. La Recherche 457: 72-75.

Sen, R., 2005. Towards a multifunctional rhizosphere concept : back to the future ? New Phytol. 168, 266-268.

Senapati B.K., Lavelle P., Panigrahi P.K., Giri S., Brown G.G. 1999. Restoring soil fertility and enhancing productivity in Indian tea plantations with earthworms and organic fertilizers. Case Studies and Practices for Improved Soil Biological Management. **Soil Biodiversity.** http://www.fao.org/ag/AGL/agll/soilbiod/cases.stm

Settle, W.H., Ariawan, H., Astuti, E.T., Cahyana, W., Hakim, A.L., Hindayana, D., Lestari, A.S., 1996. Managing Tropical Rice Pests Through Conservation of Generalist Natural Enemies and Alternative Prey**.** *Ecology*, 77: 1975-1988.

Siddiqui, M.A. 1986. Studies on the effect of organic soil amendments on plant parasitic nematodes; Ph.D. Thesis, Departement of Botany, Aligarh Muslim University, Aligarh 402 p.

Sidibé, D.K., 1993. Effect of endomycorrhizal infection, soil type and treatment on growth of Lovoa trichilioides (Bibolo), Triplochiton scleroxylon (Ayous) and Terminalia ivorensis (Framire) cuttings in Cameroon. MS c thesis,Wageninge n Agricultura l University , th e Netherlands.

Sierra J., Desfontaines L. Faverial J., Loranger-Merciris G., Boval M., 2013. Composting and vermicomposting of cattle manure and green wastes under tropical conditions: carbon and nutrient balances and end-product quality. *Soil Research* **51**, 142–151.

Sierra, J., Nygren, P., 2006. Transfer of N fixed by a legume tree to the associated

Singh, R.S., Sitaramaiah, K., 1973. Control of plant parasitic nematodes with organic amendments of soil. Exp. Sta. Res. Bull. N° 6, G.B. Pant Univ. Agric. & Tech, Pantnagar (Uttranchal).

Slutsky, M., Levin, J., Levy, B., 1999. Azoospermia and oligospermia among a large cohort of DBCP applicators in 12 countries. International Journal of Occupational and Environmental Health 5, 199–201.

Solagro, 2002. http://www.solagro.org/site/014.html.

Speijer, P.R., De Waele, D., 1997. Screening of *Musa* germplasm for resistance and tolerance to nematodes. INIBAP Technical Guildelines 1. INIBAP, Montpellier, 42 p.

Speijer, P.R., Ssango, F., Kajumba, C., Gold, C.S., 1998. Optimum sample size for *Pratylenchus* goodeyi (Cobb) sher and allen density and damage assessment in highland banana (Musa AAA) in Uganda African Crop Science Journal, 6 (3), 283-291.

Speijer, P.R., Kajumba, C., Ssango, F., 1999. East African highland banana production as influenced by nematodes and crop management in Uganda. International journal of pest management, 45 (1).

Speijer, P.R., De Waele, D., 2001. Nematods associated with East African Highland cooking bananas and cv. Pisang Awak (Musa spp.) in Central Uganda. Nematology, 3 (6). 535-541.

Ssali H., McIntyre B.D, Gold C.S., Kashaija I.N., Kizito, F., 2003. Effects of mulch and mineral fertilizer on crop, weevil and soil quality parameters in highland banana Nutrient cycling in Agroecosystem, 65, 141-150

Stork, N.E., Eggleton, P., 1992. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. Am. J. Alternative Agric. 7, 38–47

Stover, R.H., 1983. Effet du cercospora noir sur les plantazins en Amérique central, Fruits 38 (4), 326-329.

Strosse, H, Schoofs, H, Panis, B, André, E, Reyniers, K., Swennen, R., 2006. Development of embryogenic cell suspensions from shoot meristematic tissue in bananas and plantains (Musa spp.). Plant Sci. 170 : 104-112.

Subbian, P., Lal, R., Subramanian, K.S., 2000. Cropping systems effects on soil quality in semi-arid tropics. J. of Sustain. Agr. 16, 7-38.

Swennen, V., 2001. Le Bananier In: ROMAIN H. et al. Agriculture en Afrique Tropicale, Bruxelles, Belgique, 2001, p 611-635

Swift, M.J., Izac, A.M.N., Noordwijk, M., 2004. Biodiversity and ecosystem services inagricultural landscapes-are we asking the right questions ? Agriculture, Ecosystems and Environment **104**: 113-134.

Sys, C., van Ranst, E., Debaveye, J., Beernaert, F., 1993. International Training Centre for Post-Graduate Soil Scientists (ITC) University Ghent. Agricultural Publications No. 7, General Administration for Development Cooperation, Brussels, Belgium.

Tabarant, P., Villenave, C., Risède, J.M., Roger-Estrade, J., Dorel, M., 2011. Effects of organic amendments on plant-parasitic nematode populations, root damage, and banana plant growth. Biol Fertil Soils, 47 : 341–347

Talwana H.A.L., Speijer, P.R., Gold, C.S., Swennen, R.L., De Waele, D., 2003. A comparison of the effects of nematodes Radopholus similes and *Pratylenchus* goodeyi on growth, root health and yield of an East African highland cooking banana (Musa AAA-group) International Journal of Pest Management 49 (3), 199-204

Tarafdar, J.C., Rao, A.V., 1997. Response of arid legumes to VAM fungal inoculation. Symbiosis 22, 265–274.

Tarjan, A.C., 1961. Longevity of *Radopholus similis* (Cobb) in host free soil. Nematologica 6, 170–175.

Tchango, J. Et Ngalani J., 1998. Transformation et utilisation alimentaire de la banane plantain en Afrique Centrale et Occidentale, In : Bananas and Food Security, 361-365p.

Tenkouano, A., Hausser, S., Coyne, D., Coulibaly, O., 2006. Clean planting material and management practices for sustained production of banana and plantain in Africa. Crhonica Horticulurae, 46, 14-18.

Ternisien, E., 1989. Study of crop rotations in banana plantations. II. Impact of rotated crops on banana production and the health of the soil. Fruits 44, 445-454.

Ternisien, E., Ganry, J., 1990. Rotations culturales en cultures bananière intensive. Fruits (Spécial Bananes) 45, 98-102.

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. SIMBA-POP : a cohort population model for longterm simulation of banana crop harvest. Ecological Modelling 180, 407-417.

Tixier, P., Salmon, F., Chabrier,C.,Quénéhervé,P.,2008. Modelling pest dynamics of new crop cultivars : the FB920 banana with the Helicotylenchus multicinctus - Radopholus similis nematode complex in Martinique. Crop Prot. 27,1427-1431.

Tixier, P., Vinatier, F., Cabrera Cabrera, J., Padilla Cubas, A., Okolle, J., Chabrier, C., Guillon, M.. 2010. Lutte intégrée contre le charançon noir dans les systèmes de culture bananière. Éd. endure, guide numéro 3. 40

Tixier, P., Lavigne, C., Alvarez, S., Gauquier, A., Blanchard, M., Ripoche, A., Achard, R., 2011. Model evaluation of cover crops, application to eleven species for banana cropping systems. European Journal of Agronomy 34, 53-61.

Topoliantz, S., Ponge, J.F., Viaux, P., 2000. Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. Plant and Soil 225, 39–51.

Tremblay, A.M., 2003. La culture de banane sur la zone bananière en Guadeloupe les pratiques des producteurs et les déterminants : mémoire de fin d'études - UAG, 99 p.

Turbé, A., Toni, A., Benito, P., Lavelle, P., Ruiz, N., Van der Putten, W.H., Labouze, E., Mudgal, S., 2010. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment).

Vallad, G.E., Cooperband, L., Goodman, R.M., 2003. Plant foliar disease suppression mediated by composted forms of paper mill residuals exhibits molecular features of induced resistance. Physiological and Molecular Plant Pathology 63: 65-77.

Van Gundy, S.D., Stolzy, L.H., Szuszkiewicz, T.E., Rackham, R.L., 1962. Influence of oxygen supply on survival of plant parasitic nematodes in soil. Phytopathology, 52, 628-632.

van Wendel de Joode, B.N., De Graaf, I.A.M., Wesseling, C., Kromhout, H., 1996. Paraquat exposure of knapsack spray operators on banana plantations in Costa Rica. International Journal of Occupational and Environmental Health 2 (4), 294–304.

van Wendel de Joode, B., Wesseling, C., Kromhout, H., Monge, P., Garcia, M., Mergler, D., 2001. Chronic nervous-system effects of long-term occupational exposure to DDT. Lancet 357 (9261), 1014–1016.

Velasquez E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007a. GISQ a multifonctional indicator of soil quality. Soil Biol. Biochem. 39: 3066-3080.

Velasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A.C., Barrios, E., Lavelle, P., 2007b. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. Pedobiologia 51: 75-87.

Vilain L., 2003. La méthode IDEA, indicateurs de durabilité des exploitations agricoles - Guide d'utilisation. Educagri éditions, Dijon, 151 p.

Vilardebó, A., 1984. Problèmes scientifiques poses par ;, *Radopholus similis* et *Cosmopolites sordicus* en cultures bananières des zones francophones de production. Fruits. 39 :4, 227-233.

Villenave, C., Fernadez, P., Badiane, A., Sène, M., Ganry, F., Oliver, R. 1998. Influence du travail du sol et de l'apport de compost sur les peuplements de nématodes phytoparasites.In 16ème Congres Mondial de l'Association Internationale de Science du Sol, Montpellier 20-26 août, 1998.

Villenave, C., Chotte, J.L., Masse, D., Youl, S., Manlay, R.J. 2007. Soil nematofauna in the rhizosphere of different crops indicated specificity in soil bio-functionning. In Rhizosphere 2, Montpellier, France, 26 -31 August 2007.

Villenave, C., Oumar ba, A., Rabary, B., 2009. Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). Etude et Gestion des Sols, volume 16, 369-378.

Vos, C., Van Den Broucke, D., Mbongo Lombi, F., De Waele, D., Elsen, A., 2012. Mycorrhiza-induced resistance in banana acts on nematode host location and penetration. Soil Biology and Biochemistry 47, 60-66.

Wardle, D. A., 1999. How soil food webs make plants grow. Tree **14**: 418-420.

Wardle, D. A., Yeates, G. W., Watson, R. N. & Nicholson, K. S., 1995. The detritus food-web and the diversity of soil fauna as indicators of disturbance regimes in agro-ecosystems. Plant and Soil **170**(1): 35-43.

Willson G.B., 1989. Combining raw materials for com-posting. BioCycle. 30, 82-83.

Wilson, M. J., Maliszewska-Kordybach, B. 2000. *Soil quality, sustainable agriculture and environmental security in Central and Eastern Europe*. Dordrecht [Netherlands], Kluwer Academic Publishers. MLA (7th ed.)

Winslow, R., 1995. The hatching responses of some root eelworms of the genus Heterodera. Ann. Appl. Biol. 43, 19-36.

Wolters, V., 2001. Biodiversity of soil animals and its function. *Eur. J. Soil Biol*. **37**, 221-227.

Yamaguchi, Y., Araki, S., 2004. Biomass Production of banana plants in the indigenous farming system of the East African Highland. A case of study on the Kamachumu Plateua in northwest Tanzania. Agrculture, Ecosystems and Environnement 102, 90-111.

Zem, A.C., Alves, E.J., 1983. Efeito de diferentes praticas sobre a populaçao de Radopholus similis, Reuniao Brasileira de Nematologia, Piracicaba (BR). Sociedade Brasileira de Nematologia Publicaçao, Brazil, 7, 215-225.

ANNEXES

ANNEXE I

GUIDE D'ENQUÊTE-DIAGNOSTIC AGRO-ENVIRONNEMENTAL
"Alternatives agroécologiques en système de culture de banane plantain"

Enquête réalisée le ……....

Enquêteur : ……..

1. Identification et caractérisation de l'exploitant

Nom et Prénoms			**Age**		**Nb sites exploités**	
Coordonnées	Exploitant		Fixe :			
	Exploitation		Mobile :			
Age d'installation		**Conditions d'installation**	Reprise ◯		Achat	
Quand et pourquoi ce choix ?						
Activités exploitant	**Principale**		**Secondaire**		**Antérieures**	
Activité du conjoint						
Formation Agricole		**Passé Agricole**				
Niveau de Formation (Etudes)						
Ancienneté dans la production de plantain						
Situation familiale X	Marié ☐	Célibataire ☐	Divorcé ☐	Concubin ☐		
Nombre d'enfants		**Nombre de personnes à charge**		**Nb de familiaux participant à l'activité agricole**		
Histoire de l'exploitant et Evolution de la SAU (ha)						
Implication dans réseaux et OPA (nommer)						

2. Structure et description de l'exploitation

Altitude (m)		**Pluviométrie**		**Coordonnées GPS**	Long. : Lat. :
Position géographique (Oui/non)	Piémont		Plaine drainée		Zone hydromorphe
Exposition de l'exploitation au vent X	Au vent ☐		Sous le vent ☐		Exposé ☐
	Peu exposé ☐		Présence de brise vent ☐		Autre ☐
Voiries (lg m /Km) X	Bon état général ☐		Manque de voiries ☐		Mauvais état ☐
	Tuf (m) :		Béton (m) :		Terre (m) :
Bâtiments	Hangars (nombre, âge, capacité,…)			Autres (préciser)	
Surfaces (ha)	**Totale**		**Banane Plantain**		
	Autres Productions				
Système d'irrigation	**Date d'établissement**	**Date Réhabilitation**	**Etat actuel**	**Perception de l'enquête du système**	
Parcellaire	Nombre de parcelles		dispersé (O/N)		Distance Parcelles-voiries

3. Détails du parcellaire de l'exploitation (1)

Parcelle 1	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile ( ) Difficile							
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			
Parcelle 2	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile ( ) Difficile							
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			
Parcelle 3	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile ( ) Difficile							
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			

Détails du parcellaire de l'exploitation (2)

Parcelle 4	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**					
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)				
	Variétés cultivées									
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre				
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité				
	Conditions hydriques (O/N)									
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche		
	Accès irrigation	Facile (○) Difficile								
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début				
						Fin				
Parcelle 5	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**					
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)				
	Variétés cultivées									
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre				
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité				
	Conditions hydriques (O/N)									
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche		
	Accès irrigation	Facile (○) Difficile								
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début				
						Fin				
Parcelle 6	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**					
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)				
	Variétés cultivées									
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre				
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité				
	Conditions hydriques (O/N)									
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche		
	Accès irrigation	Facile (○) Difficile								
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début				
						Fin				

Détails du parcellaire de l'exploitation (3)

Parcelle 7	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile				Difficile			
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			
Parcelle 8	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile				Difficile			
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			
Parcelle 9	**Surface (ha)**		**Pente**		**Mécanisable O/N**				
	Cultures	Précédente(s)		**Présente(s)**		Suivante(s) (envisag.)			
	Variétés cultivées								
	Statuts fonciers (ha ou car.)	Propriété	Fermage	Colonage	Indivision	Occupation ss titre			
	Type de sol	Couleur		Profondeur		Pierrosité			
	Conditions hydriques (O/N)								
	Irriguée	Inondée		Drainage facile		Drainage difficile		Sèche	
	Accès irrigation	Facile				Difficile			
	Irrigation	**Fréquence**		**Période**		Début			
						Fin			

4. La conduite technique de la banane plantain (1)

Itinéraire technique	Type 1	Type 2	Type 3
Surface (ha)			
Localisation sur l'exploitation (parcelles)			
Précédent cultural (Pourquoi ce choix)			
Type de destruction bananeraie? (Tracteur, pulvériseur, Coutelas, piqûre)			
Matériel végétal utilisé ? (Pif, rejets, vitroplants) Provenance/origine des plants ?			
Variétés de plantain			
Opérations sur les plants avant plantation ? O/N (si oui lesquelles et pourquoi ?) (Produit utilisé, dose)			
Travail du sol avant plantation • Labour au tracteur ou à la charrue • Trouaison manuelle			
Amendement (O/N) (si oui préciser **nature** (org ou min), noms, fréquence et qté apportée…**)**			
Remarques			

La conduite technique de la banane plantain (2)

Itinéraire technique	Type 1	Type 2	Type 3
Taille des plants mis en terre			
Distance entre plants / Densité (nb de pieds/ha)			
Dispositif ? (A plat, Fond sillon, planche, quinconce, ligne ou autre à préciser)			
Age de la plantation (indiquer année et mois de la plantation)			
Fréquence de replantation moyenne (règle de décision de destruction/replantation de la bananeraie)			
Désherbage manuel ou chimique (nom du produit) Temps de travail et outils /équipements			
Méthode de lutte contre les ravageurs Si chimique : Produits, doses, fréquence**,** coût et temps de travail ?			
Fertilisation (nature, dose, fréquence) Temps de travail ? coût (Euros/Gourdes) ? disponibilité?			
Disponibilité de MO ? • Toujours • Parfois Si on paie d'avance			
Analyse du sol ? oui/non si oui pourquoi ?			
Jachère spontanée / contrôlée chimiquement (Objectifs, produits, doses, fréquence**,** coût et temps de travail, durée)			
Cultures associées au plantain ? Pourquoi ?			
Disponibilité en eau ? (fréquence, durée moyenne d'un arrosage) **Technique d'irrigation ?**			

La conduite technique de la banane plantain (3)

Itinéraire technique	Type 1	Type 2	Type 3
Haubanage (systématique/ sélectif, % plants haubanés)			
Oeilletonnage (objectif, fréquence…)			
Effeuillage (objectif, fréquence…) **Ablation**			
Symptômes (noms)[5] Pestes et ravageurs maladies (observés à quel moment du cycle et depuis quelle époque ? (an)			
Qualification et quantification des dégâts Organes attaqués			
Analyse nématologique ? (O/N) si oui pourquoi ? (Présence de nécroses racinaires ?)			
Autres opérations éventuellement pratiquées			

La conduite technique de la banane plantain : performances à la parcelle (4)

Itinéraire technique	Type 1	Type 2	Type 3
Nombre de régimes récoltés			
Transport des régimes			
Tonnage ? si non évaluer ou Préciser si l'année est bonne ou mauvaise			

[5] Mauvaises herbes (ou adventices), parasites animaux (insectes, nématodes, rongeurs, mollusques, oiseaux...), champignons et maladies à virus ou bactéries.

5. Observations de l'enquêteur / type de parcelle (ITK)

Itinéraire technique	Type 1	Type 2	Type 3
Etat sanitaire de la bananeraie (% verse, % bananier/nécrose foliaire)			
Enherbement (densité d'adventices rencontrées : +, ++, +++) homogènes / hétérogènes ? graminées? légumineuses ?			
Présence de macrofaune (O/N) si oui estimer la qté, + /++/+++ (vers de terre, turricules, nids de fourmis, oiseaux, autres préciser)			
Comptage composantes du rendement - Nbre de mains/régime - Nbre de doigts / régime - Dimension des doigts (en cm)			
Autres remarques			

6. Caractérisation technico-économique de la production de plantain / exploitation

Destination production préciser %	**Consommation familiale**	**Marché citadin**	**Marché local**	**Intermédiaire**	**Export**	**Autres**
Prix unitaire (€/ pesos / gdes)						

Période pic productif (?)		**Période de rareté (?)**	
Estimation volume produit	**Prix de vente moyen**	**Estimation volume produit**	**Prix de vente moyen**

Temps de travail	
Quantité UTH	
Acheteurs plantain ? (contrat de vente de plantain ?)	
Quels investissements /plantain ? Quel emprunt ? Niveau d'endettement ?	

7. Affectation des ressources de l'exploitation (T,W,Φ)

➢ Ressources en travail (W)

Force de travail	**Production ?** Affectations de la MO (UTH/production)	**Modalités de paiement**	**Rémunération** (€/pesos/gdes) Jour/15aine/mois	**Autres (préciser)** (ex: spécialisation/opérations)
MO familiale (UTH totaux)				
MO salariée temporaire (UTH totaux)				
MO salariée permanente (UTH totaux)				
Entraide (origine) (UTH totaux)				
Equipements mécaniques et/ou motorisés				

➢ Ressources financières (Φ)

	Production (noter %)	**source financière**	**Equipements utilisés ?** disponibilité	**Besoins**
Traitements phytosanitaires				
Traitements vétérinaires				
Fertilisation/ engrais				
Désherbage (Herbicides)				
Irrigation (consommation en eau)				
Achats aliments animaux				
Préparation du sol Coût ?				
Main d'œuvre Coût ?				
Transports Coût ?				

➢ Marge manœuvre financière

Crédits, emprunts, aides

1) avez-vous accès au crédit (quel organisme) ?

2) avez-vous accès à des délais de paiement auprès des fournisseurs d'intrants ?

3) avez-vous des dettes fournisseurs ?

Les aides à l'exploitation

Nature des aides	Montant (€/peso/Gdes)	Conditions d'obtention

8. Questions ouvertes complémentaires

1) Pourquoi continuer la banane ?
Rep :_____

_____

2) De quoi avez-vous besoin pour continuer ?
Rep :_____
_____

3) A l'avenir voulez vous en terme de taille/surface :
a) augmenter la surface de votre culture b) la diminuer c) la maintenir
Pourquoi ?
Rep :_____

_____

4) Associez vous plusieurs variétés de banane légume ? (O/N)_____ si oui pourquoi ?
Rép. :_____

_____

5) Quels sont vos principaux problèmes avec la culture de banane plantain?
Rép. :_____

_____

6) Suivis techniques, travaillez vous avec des techniciens ? (O/N) _____ lesquel ( )
?_____

_____

ANNEXE II

PROTOCOLE DE DIAGNOSTIC AGRO-ECOLOGIQUE DE LA CULTURE DE BANANE PLANTAIN

Justification du choix de la méthode de diagnostic

Les données disponibles sur les systèmes de cultures de bananes plantain en Guadeloupe sont minimes ou peu diffusées. Une méthode de diagnostic agro-écologique a été choisie dans le but d'identifier et d'analyser les problèmes agronomiques et notamment phytosanitaires liés à la conduite culturale en vue de dégager les contraintes à la production et proposer les voies d'amélioration aux producteurs de plantain. Ce diagnostic sera réalisé sur un sous échantillon de parcelles raisonné à partir de l'enquête globale menée sur la culture de la banane plantain en Guadeloupe.

Objet et domaine d'application du protocole

Ce protocole vise à décrire l'échantillonnage des parcelles de bananes plantains sélectionnées a l'issu du diagnostic agri-environnemental en vue d'un diagnostic agro-écologique. Il peut être également utilisé dans les autres plantations de bananes (quelque soit la variété).

Objectifs du diagnostic agroécologique

Les objectifs assignés à ce diagnostic sont les suivants :

- Comprendre comment les composantes environnementales et techniques affectent l'état phytosanitaire des parcelles et les niveaux de production.
- Identifier les principes écologiques qui sous-tendent des possibilités de régulation biologiques des bioagresseurs.

Les tâches découlant de ces objectifs sont les suivantes :

i) Caractériser et évaluer la diversité des pratiques agricoles actuelles dans les SDCs plantain de manière à faire ressortir différentes situations contrastées
ii) Evaluer l'impact de ces pratiques sur l'environnement, sur l'état sanitaire et la performance de la plante

Hypothèse majeure : La biodiversité élevée et les apports de matière organique dans une parcelle i contribuerait à réduire la pression du complexe parasitaire tellurique et à renforcer la vigueur du bananier plantain, ce qui améliorait les performances et la durabilité des systèmes de culture à base de bananiers plantains.

Principe de la méthode

Avec le soutien des stagiaires et l'accord des agriculteurs, une typologie des exploitations a été réalisée en Guadeloupe (Forite, 2011 ; Ogisma, 2011) et en Haïti. Celle-ci a permis de sélectionner les parcelles représentatives des exploitations dans les deux régions (une vingtaine en Guadeloupe et une dizaine en Haïti), pour la réalisation du diagnostic agro-écologique (voir tableau 1)

Tableau 16 : Présentation des différents systèmes de culture plantains en Guadeloupe et en Haiti

Systèmes de culture	Guadeloupe	Haïti
Jardins créoles = Banane pérenne	3 parcelles	0
Précédent-banane + Zéro intrant	Inexistant	3 parcelles
Précédent-banane + faible niveau d'intrants	2 parcelles	2 parcelles
Précédent-banane + fort niveau d'intrants	5 parcelles	Inexistant
Précédent-manioc + zéro intrant	Inexistant	2 parcelles
Précédent-ananas + faible niveau d'intrants	1 parcelle	0
Précédent-ananas + fort niveau d'intrants	4 parcelles	Inexistant
Précédent-jachère + faible niveau d'intrants	2 parcelles	5 parcelles
Précédent-jachère + fort niveau d'intrants	6 parcelles	inexistant

L'application de cette méthode de diagnostic au sein de ces parcelles comporte plusieurs étapes :

1. **Stratification et caractérisation de la parcelle** Au sein d'une parcelle homogène choisie, noter ses caractéristiques générales (*Fiche*1) : (relief, hétérogénéité du couvert et du sol, cultures associées, présence de paillis,...
2. **Diagnostic de problèmes phytosanitaires aériens et telluriques à la floraison et à la récolte**

A- Au niveau tellurique

A-1- à la floraison

Afin d'éviter tout effet bordure, se placer à au moins 1 mètre des bords de la parcelle homogène, puis tracer un *W* permettant de délimiter les 5 points de prélèvements en choisissant 5 bannaiers (voir fig. 1 ci-contre). Marquer ces bananiers à l'aide d'un ruban.

Figure 1 : Dispositif d'échantillonnage « W »

i) A 20 cm de chaque bananier marqué (côté pied porteur), un prélèvement est effectué à l'aide d'un carré de 25×25×20 cm ou une pelle bêche. Le sol est réparti dans plusieurs bacs afin de récupérer la **macrofaune** qui s'y trouve. Cette macrofaune est collectée dans des flacons de 150 ml, préalablement étiquetés et remplis d'alcool à 70°. Les **racines** sont récupérées dans des sacs plastiques afin de mesurer leur taux de nécrose et d'extraire les nématodes phytoparasites. Le **sol** est ensuite mélangé puis collecté dans plusieurs sacs plastiques permettant de faire : i) les analyses chimiques (2×500g) ; ii) l'extraction des nématodes du sol et des mycorhizes (600g).

ii) A 50 cm du bananier marqué, faire un prélèvement à l'aide d'un cylindre de 10×10×10 cm pour la morphologie. Placer délicatement l'échantillon dans un sachet étiqueté. Les agrégats d'origines diverses seront identifiés au laboratoire sous loupe binoculaire.

iii) A 1 m de chaque côté (Nord-Sud) du bananier marqué, 2 autres prélèvements sont effectués (N-S) à l'aide d'un carré de 25×25×10 cm. La macrofaune du sol et de litière est collectée dans deux flacons distincts (N-S), préalablement étiquetés et remplis d'alcool à 70°.

iv) En chaque point d'échantillonnage, on prélèvera à l'aide d'un cylindre de volume connu 5 sous-échantillons de sol (0-15cm de profondeur) dont 1 au centre et 4 aux angles d'un carré de 5m. On placera chaque cylindre de prélèvement dans un sachet étiqueté. Ces sachets seront délicatement conservés dans une glacière sur le terrain avant d'être transportés au laboratoire. Ces échantillons seront utilisés pour réaliser les analyses **physiques** (***Humidité à 105°C, Densité apparente et résistance à la pénétration***)

Rq$_1$*: les bananiers étant plantés environ tous les 2.5 m, il faut situer les points de prélèvements par rapport aux bananiers (autrement on risque de faire des prélèvements sur les pieds de bananiers ou dans des vieilles souches*…).

Rq$_2$: O*n évitera d'entasser les échantillons prélevés pour les analyses physiques.*

A-2- A la récolte

- A la récolte des régimes, une évaluation des **dégâts causés par les <u>charançons</u>** sera faite sur au moins 5 bananiers venant d'être récoltés dans la parcelle. pour ce faire, déterrer le bulbe à l'aide d'une fourche et/ou barre à mine, puis le sectionné transversalement afin de mesurer son diamètre et les longueurs des galeries faites par les larves de charançons du bananier.
- Prendre une photo du bulbe (toujours à la même résolution). Noter l'identifiant de chaque photo à côté des mesures correspondant au même bananier. Ces photos seront traitées au laboratoire à l'aide du logiciel MESURIM, ce qui permettra d'estimer les dégâts des charançons (longueur totale des galeries/surface observée).
- Les populations de charançons peuvent être également évaluées via des captures à l'aide des pièges à phérormones (si disponible) mise en place sur la parcelle pendant 3 semaines.
- Le pourcentage de verse est effectué (nombre de bananiers versés/nombre total de bananier par parcelle**)**

Reporter toutes ces données sur la fiche correspondante en *Fiche* II.

B- Au niveau aérien à la floraison

Sur le périmètre choisi, on observera le feuillage du peuplement pour détecter les nécroses foliaires pouvant avoir diverses origines et on remplira la fiche correspondante en *Fiche* III:

Cercosporiose jaune (**noire absente en Guadeloupe)** : De manière générale, le premier symptôme apparaît sur la face supérieure du limbe sous la forme de : ***tirets jaune pâle ou marron foncé sur la face inférieure du limbe de 1 à 2mm de long***, qui s'élargissent pour former des ***lésions nécrotiques à halo jaune et centre gris clair (fig. 2)***. On notera le pourcentage de feuilles infestées en allant de 0 (feuille saine) à 25, 50, 75, 100 % (feuille complètement nécrosée) sur l'ensemble de feuilles possédant le bananier en fonction des stades d'infestation.

N.B : Ne pas confondre les nécroses dues à la Cercosporiose par rapport à la sénescence foliaire et, au jaunissement du aux carences en éléments minéraux ou à la toxicité.

Figure 2 : nécroses foliaires due à la maladie de la Sigatoka noire (en Haïti)

Carence en magnésium : se traduit par une ***décoloration terne du feuillage, un jaunissement débutant dans la partie externe des feuilles***, ***un liseré vert subsistant sur la bordure*** (symptôme de « chlorose magnésienne », fig. 3). Dans certains types de sols, les sols ferralitiques notamment, ces symptômes de chlorose s'accompagnent de ***marbrures au niveau des pétioles*** (***symptôme du « bleu magnésien*** ») On notera le pourcentage de feuilles présentant un signe de carence (0 à 4) selon le niveau de cette carence en Mg soit nulle à élevé.

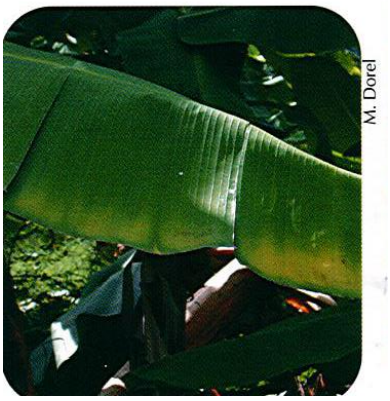


Figure 3 : Chlorose magnésienne

Carences en Potassium (K) : les symptômes de la carence en potassium apparaissent principalement au stade fleur pointant. Ils se caractérisent par une ***fanaison rapide des feuilles les plus âgées qui prennent une couleur jaune orangé caractéristiques*** tandis que leur ***extrémité se dessèche et se recourbe en crosse***. Cette carence se traduit également par une ***accentuation de la courbure et un mauvais remplissage des fruits***. Elle entraine des risques de mûrs d'arrivage. On notera le pourcentage de feuilles présentant un signe de carence (0 à 100%) en K.

Carence en soufre : la carence en soufre s'observe surtout sur de jeunes bananiers. Les ***feuilles nouvellement émises présentent un retard de coloration***. Elles sont de couleur jaune et n'atteignent une coloration verte normale qu'une dizaine de jours après leur émission.

Carence en Bore : le Bore est un élément fondamental pour l'obtention de rendements maximaux des bananiers plantains tant en qualité qu'en quantité. Pourtant, les carences en bore ne sont ***pas très facile à identifier sinon par des analyses foliaires (Fiche V) ou de sol***. La carence en bore affecte drastiquement ***le remplissage des fruits***, à tel point que ***les fruits se déforment, murissent prématurément*** et tel que leur ***taille se réduit***, entrainant une ***diminution de la production*** (Bolanos et Garcia in Infomusa vol, 11 N° 1).

Carence en fer : Elle s'observe généralement sur les sols à pH élevé (supérieur à 7) et riches en calcaire (en Grande terre par ex.) Les carences sont

particulièrement marquées sur les sols courts et caillouteux des mornes. Les feuilles des bananiers carencés en fer présentent une ***décoloration des espaces internervaires, les nervures secondaires restant par contre vertes*** (symptôme de chlorose ferrique, fig. 4).

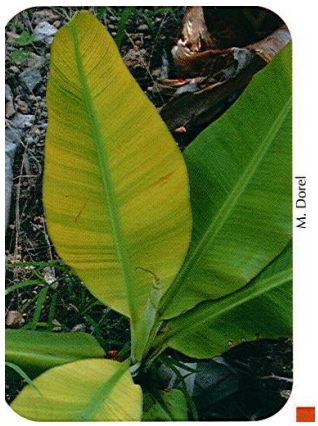


Figure 4 : Chlorose ferrique

Toxicité manganique : elle se caractérise par ***un noircissement du bord des limbes évoluant en nécroses (fig. 5)***. Elle s'observe généralement sur les sols les plus évolués (sols à halloysite, sols ferralitiques) dans des conditions de pH acide (inférieur à 5,5), de mauvais drainage ou de sol compacté. On notera le pourcentage de feuilles présentant un signe de carence (0 à 100%) selon le degré de la toxicité.

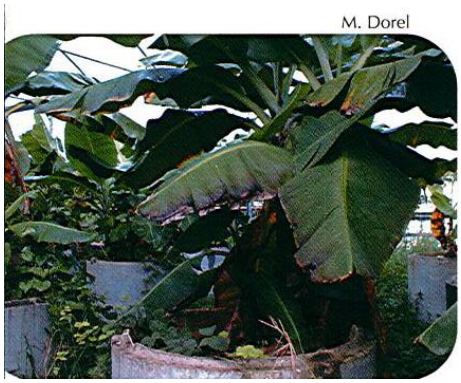


Figure 5 : Toxicité manganique

Carence en Zinc : la carence en Zinc est relativement fréquente en Guadeloupe. Cependant, elle affecte peu la croissance et la productivité du bananier. Les symptômes de la carence en zinc s'observent sur les jeunes feuilles. Celles-ci présentent ***une alternance de bandes décolorées et de bandes vertes, parallèles aux nervures secondaires*** (chlorose en bandes). ***Une pigmentation lie de vin*** de la face inférieure du cigare peut également être associée à cette carence.

Engorgement foliaire : c'est l'une des conséquences d'un déficit hydrique chez le bananier. A cet effet, on observera un ***engorgement du bouquet foliaire*** permettant à la plante de limiter ses pertes en eau. On notera le pourcentage de plants par parcelle qui présente cet engorgement.

Toxicité au Chlore : l'intoxication au chlore provoque le ***même type de symptôme*** et apparait lorsque du chlore issu de l'application répétée d'engrais riche en chlore (chlorure de potassium « KCl ») s'accumule dans le sol. Elle s'observe généralement en période sèche sur des sols à drainage lent.

Excès de la salinité : **l'excès de salinité** provoque ***un jaunissement du bord des limbes***, qui évolue en ***nécroses***. Il s'observe dans les sols mal drainés de bord de mer ou sur des bananiers soumis aux embruns marins /

Autres observations : vérifier si les feuilles ne sont pas attaquées par les ***coléoptères*** (Hannetons,…) et tous les autres symptômes qui sont visibles sur la plante.

3- Diagnostic de la productivité de la parcelle à la floraison et à la récolte

Afin d'estimer le rendement à la parcelle (*Fiche* IV), on comptera le nombre de doigts des régimes (après rejet de la bractée) de au moins 10 bananiers choisis (de préférence ceux échantillonnés pour les analyses foliaires). Ensuite, la circonférence du pseudo-tronc est mesurée à 1m du sol. Ces 10 bananiers sont ensuite marqués au ruban et un rendez- vous est pris, de concert avec l'agriculteur, pour pouvoir peser leur régime à la récolte.

Si possible, une photo hémisphérique de ces 10 bananiers peut être prise afin de calculer la surface foliaire « LAI » du peuplement végétal dans chaque parcelle.

4- Consommables et équipements utilisés pour les prélèvements *in vivo*

Chimie Mycorhizes	**Morphologie**	**Nématologie Charançons**	**Faune**	**Divers**
-Carotteur -sachets -Seaux	-Couteau aiguisé -Petite pelle -Règle - sachets	-Bêche -Coutelas -Couteau aiguisé -Ruban métrique -Règle -sachets	-Cadre -Fourche -Pelle -Bêche - Flacons -Bacs de tri -Alcool à 70° -Pinces	-Feutres -Crayons papier -Etiquettes -Sacs poubelles -Glacières -Gants -Appareil photo - Fiches de renseignement (Excel) - Peinture

- **Précautions de sécurité**

  Des gants jetables sont préconisés lors des prélèvements de sols.
  Blouses et vêtements de travail sont obligatoires pour les prélèvements sur le terrain.

- **Conditionnement des échantillons**

  Sachets zippés conservés dans une glacière durant le transport puis à +4°C et/ou au congélateur selon l'analyse.

FICHE 1.

CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA PARCELLE

Exploitant : ……
Lieu :……
Enquêteur(s):……..

Parcelle N° :	**Altitude**	**Latitude**	**Longitude**	**Pente**
Orientation	**Surface (ha)**	**Enrochement (%)**	**Type de sol**	**Pierrosité (%)**
% paillis	**% sol nu**	**% enherbement**	**espèce d'herbe dominante ?**	**Concrétions ferro-manganique (%)**
Présence d'arbres dans la parcelle	**Proximité de parcelle (**cult, forét, cours d'eau)			
Mode de conduite				
Age plantation	**Préparation du sol** Labour ou manuel	**Traitement des plants**	**Distance entre les plants**	**Densité de rejets** (faible, moyen, élevée)
Précédent cultural	**Variété(s) présente**(s)	**Autres espèces présentes** (associations)		

Apports d'INTRANTS				
Nature	**Produit utilisé**	**Dose**	**Fréquence / cycle**	**Date dernière application**
Désherbage manuel/chimique				
Fertilisation chimique O/N ?				
Fertilisation organique O/N ?				
Amendements O/N ?				
Insecticides O/N ?				
Nématicides O/N ?				
Fongicides O/N ?				
Autres (préciser)				

FICHE 2

Description des symptômes telluriques sur le terrain à la floraison et à la récolte

Evaluation globale des dégâts des charançons										
Bananier récemment Récolté		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Diamètre du bulbe (cm)											
Taux d'infestation charançons	Surface totale observée (cm^2)										
	Longueur totale des galeries (cm)										
% Pied infesté	Nombre de pied infe / Nombre de pied obse										
% verse	Nombre de plants versés/parcelle		% plants versés				Stade des plants versés				
Populations de charançons adultes capturés/semaine											

Evaluation des symptômes telluriques au laboratoire

Evaluation des symptômes telluriques : nématodes (INR)											
Bananier choisi		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Nombre de racines Nécrosées /Nombre de racines observées	1 = Saine										
	2 = [0-25] %										
	3 = [26-50] %										
	4 = [51-75]%										
	5 = [76-100]%										
INR (%)											
Formule de l'INR (0<INR<0.875)		**INR =** $\frac{(□*□+□*□.□□□+□*□.□□□+□*□.□□□+□*□.□□□)}{□+□+□+□+□}$ ***100**									

FICHE 3

Description des symptômes aériens de la parcelle sur le terrain

Evaluation globale des symptômes Aériens			
% **Cercosporiose jaune**	**% Carence en Mg** (0, +, ++, +++)	**% Carence en Fe** (0, +, ++, +++)	**% Carence en K** (0, **+, ++, +++**)
% Carence en B (0, **+, ++, +++**)	**% Carence en Zn** (0, **+, ++, +++**)	**% Carence en S** (0, **+, ++, +++**)	**%Toxicité Mn** (0, **+, ++, +++**)
% Intoxication au Cl (KCl) (0, **+, ++, +++**)	**% Intoxication au Cl** (NaCl) (0, **+, ++, +++**)	**% Engorgement foliaire**	**Autres observations**

FICHE 4

Diagnostic du niveau de productivite de la parcelle

Bananier au même stade floraison										
Bananier	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Circ. Pseudot. (cm)										
Nbre de mains /régime										
Nbre de doigts /régime										
Poids du régime (Kg) à la récolte										

FICHE 5

3. Description analyse foliaire

- L'analyse de la 3ème feuille du bananier au stade floraison permet d'effectuer un diagnostic de la nutrition minérale du bananier. Au sein de chaque parcelle, on sélectionnera 5 plants supplémentaires ajoutés aux 5 plants préalablement marqué. Sur ces 10 bananiers, on identifiera la 3ème feuille en partant de la dernière feuille du haut (bractée écartée). On découpera 10 cm du limbe au milieu du limbe foliaire à l'aide d'une paire de ciseaux puis, on enlèvera la nervure centrale et on divisera les deux moitiés en deux parties égales (figure . Puis, on placera les 2 ¼ extérieurs du limbe (analyse de toxicité manganique) dans un sachet étiqueté et les 2 ¼ intérieurs (analyse foliaire) dans un autre sachet étiqueté. Les feuilles sont séchées à l'étuve (à 105 °C pendant 48 heures), puis broyées et mises dans des bocaux identifiés avant d'être expédiées au laboratoire.

-

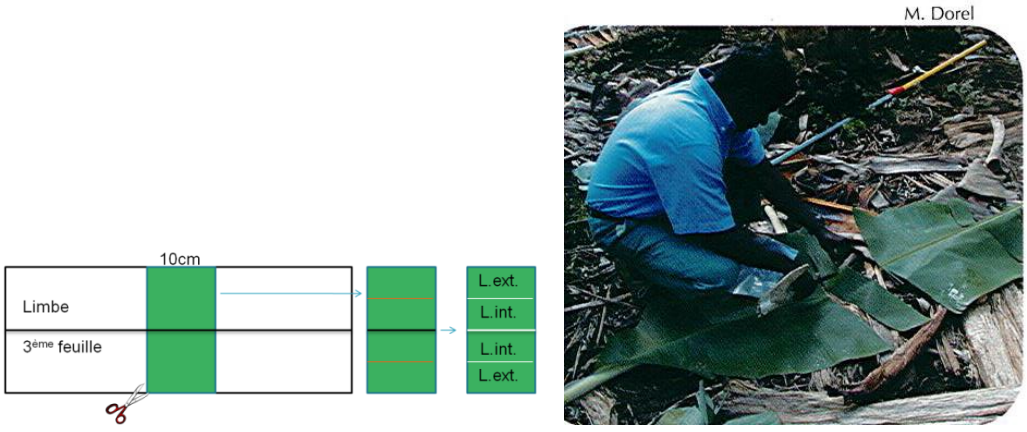


Figure 6 : Echantillonnage Analyse foliaire

ANNEXE III

Précédent-ananas

Code : KL Lieu : Petit Bourg_Versaille Sol : Ferralsol SDC : Herbe De Guinée/ Ananas/Plantain (French)	Précédent : Ananas_Faible Intrant Herbicide : Basta, 170ml.15l D'eau, 4fois Par An Engrais Chimique : Urée, 14/4/28 tous Les 2 Mois Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides :Non
Code : KJ' Lieu : Capesterre_Cambrefort Sol : Andosol SDC : Ananas/Plantain (French)	Précédent : Ananas_Fort intrant Herbicide : Clinique, 1l.100ld'eau, 3fois Par An Engrais Chimique : Urée, Dap, 12/12/17,12/10/20, 14/4/25, Sulpamag : 100g/Plant Tous Les Mois Engrais : Organique : Vignace+Bagace+Ecume+Firalgue15+Fumier (Bœuf+Poule) Nématicides/Insecticides : Nématorin, 4 A 8 Mois
Code : KJL' Lieu : Goyave Sol : Ferralitique SDC : Ananas/Plantain (French)	Précédent : Ananas_Fort intrant Herbicide : Basta, 2l/250l D'eau 4fois Par An Engrais Chimique : Urée, Dap ;14/4/28 : 2tonnes/An, Tous Les 2 Mois Amendement : Dolomi, 4 Tonnes Par An Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin, Grésil
Code : KJL'' Lieu : Goyave Sol : Ferralitique SDC : Ananas/Plantain (French)	Précédent : Ananas Herbicide : Basta, 2l/250l d'eau 4fois Par An Engrais Chimique : Urée_Dap_14/4/28 : 2t/An, Tous les 2 mois Amendement : Dolomi, 4tonnes Par An Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin, Grésil
Code : GH Lieu/ Capesterre Neuf Chateau Sol : Andosol SDC : Ananas/plantain	Précédent : Ananas_Fort intrant Herbicide : Basta, 3fs Par An Engrais Chimique : Complet Urée 14.12.13, 5fs/an Amendement : Calcaire Broyer Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Vydate Parage
Code: BI Lieu : Goyave_Blonzac Sol : Ferralitique Sdc : Patate Douce/Ananas/Plantain (French)	Précédent : Ananas_Fort intrant Herbicide : Basta 2 Fois/An Engrais Chimique : Urée Complet 3 Fois Par An Engrais Organique : non Nématicides/Insecticides : Nématorin, Vydate

Précédent-jachère

Code : SR Lieu : Goyave-Bois sec Sol : Ferralsol Sdc : Plantain/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Jachère_Fort intrant Herbicide : Basta 2 Engrais Chimique :Dap_Urée_Complet tous les mois Engrais Organique : non Insecticide Fongicide : Nématorin, Vydate Labour
Code : SR' Lieu : Goyave-Bois Sec Sol : Ferralsol SDC : Plantain/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Jachère_Fort intrant Herbicide :Basta 2 Engrais Chimique : Dap_Urée_Complet tous les mois Engrais Organique : non Nématicides/Insecticides : Nématorin, Vydate Pas De Labour
Code : JR Lieu : Capesterre La Sarde Sol : Andosol SDC : Jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère_Fort intrant Herbicide : Basta 3fs/cycle Engrais Chimique : Urée Dap Complet Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin 2 Fois Par An
Code : JR' Lieu/ Capesterre La Sarde Sol : Andosol SDC : Jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère _Fort intrant Herbicide :Basta 3fs/cycle Engrais Chimique : Urée Dap Complet tous les mois Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin 2 Fois/an
Code: LJ Lieu : Goyave_Blonzac Sol : Ferralsol SDC : Jachère/Plantain (French)	Précédent : Jachère _Fort intrant Herbicide : Basta, 1l.200l D'eau Engrais Chimique : Urée,_15/20/30 tous les mois Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Grésil_Nématorin : 1 Capsule A La Plantation
Code : KJ Lieu : Capesterre_Cambrefort Sol : Andosol Sdc : Jachère/Plantain (French)	Précédent : Jachère_Fort intrant Herbicide :Clinique, 1l.100ld'eau, 3fois/an Engrais Chimique : Urée_Dap_ 12/12/17,12/10/20, 14/4/25, Sulpamag/ 100g Par Pied Tous Les Mois Engrais organique : Vignace + Bagace + Ecume + Firalgue 15+Fumier (Bœuf+Poule) Nématicides/Insecticides : Nématorin, 4 à 8 Mois

Banane pérenne

Code : GM Lieu : Gourbeyre Sol : Halloysite Sdc : Jachère/Banane Dessert/Plantain (Dominico Harton)	Précédent : Banane Pérenne (3ans)_Faible intrant Herbicide : Non Engrais Chimique : Oui Engrais Organique : Oui (compost) Nématicides/Insecticides
Code : GM' Lieu : Gourbeyre Sol : Halloysite Sdc : Jachère/Banane Dessert/Plantain (Dominico Harton)	Précédent : Banane Pérenne (7ans)_Faible intrant Herbicide : Non Engrais Chimique : Oui Engrais Organique : Oui (Compost) Nématicides/Insecticides : Non
Code:Fm Lieu : Sainte Rose Sol : Ferralitique Sdc : Jachère/Plantain (Dominico Harton)	Précédent : Banane Pérenne (10 Ans)_Faible intrant Herbicide : Non Engrais Chimique : Non Engrais Organique : Déchets Ménagers Nématicides/Insecticides : Non

Précédent-banane

Code : AAF Lieu : Capesterre La Sarde : Ferralitique Sdc : Plantain/Jachère /Banane Plantain ((French)	Précédent : Banane_Fort intrant Herbicide : Basta, 1,5l.200l D'eau, 2 Fois Par An Engrais Chimique : Urée_complet : 100g/plant tous les 3 mois Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin
Code : DP Lieu :Capesterre_Cambrefort Sol : Andosol Sdc : Banane Pomme/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Banane_Faible intrant Herbicide : Basta 3 fs/an Engrais Chimique : Urée, Dap, Complet 3fois Par An Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Non Parage
Code : KJL Lieu : Goyave Sol : Ferralsol Sdc : Plantain/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Banane_Fort intrant Herbicide : Basta, 2l.250l D'eau 4fois Par An Engrais Chimique :14.4.28, Urée, Dap / 2t/An, Tous Les 2jours Amendement : Dolomi, 4tonnes/an Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin, Gésil
Code : SD Lieu : Capesterre_Mon Repos : Sol : Andosol Sdc : Jachère/Plantain/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Banane_Fort intrant Herbicide : Engrais Chimique : Oui Engrais Organique : non Nématicides/Insecticides

Code : Dsp27a Lieu : Petit Bourg_Duclos Sol : Ferralsol SDC : Jachère/Plantain (French)/Jachère	Précédent : Banane_Faible intrant Herbicide : Non Engrais Chimique : Non Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Non
Code : NS Lieu : Petit Bourg_Valombreuse Sol : Ferralsol SDC : plantain/plantain (French)	Précédent : Banane_Fort intrant Herbicide : Basta, Touch Down /2l.200l^{-1} D'eau 2 à 3 Fois Par An Engrais Chimique : 12.12.17 , 12.12.35, Urée, Dap/ 150g/plant tous les mois Engrais Organique : A La Plantation Nématicides/Insecticides : Vydate, Nématorin
Code : BF Lieu : Capesterre_La Sarde Sol : Andosol SDC : Banane Poyo/Jachère/Plantain (French)	Précédent : Banane_Fort intrant Herbicides : Basta, Glyfox, Touch Down, 1l/200l d'eau, 3-4 fois/An Engrais Chimique : Urée, Magnésium, 12.12.24, 1 Poignet Tous Les 2 Mois Amendement : Chaux Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Nématorin
Code : KP Lieu : Goyave Sol : Ferralsol SDC : Plantain/Plantain (French)	Précédent : Banane_faible intrant Herbicide : Basta, 3 Fois Par An Engrais Chimique : Urée_Dap_Complet ,4fs/An Amendement : Non Engrais Organique : Non Nématicides/Insecticides : Non

Annexe IV

Fiche de renseignement des 12 parcelles diagnostiquées en Haïti

Précédent-manioc

Code : LT Lieu: Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : manioc/plantain (French)	Précédent : Manioc _Zéro intrant Association : Haricot (en début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais chimique : Non disponible Engrais organique : Non Insecticide nematicide : non
Code : FE Lieu : Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : manioc/plantain (French)	Précédent : Manioc_Zéro intrant Association : Haricot (en début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais Chimique : Non Engrais Organique : Non Insecticide Nematicide : Non

Précédent-jachère

Code : LB Lieu : Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : Jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère _Faible intrant Association : NON Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais Chimique : Complet « NPK », 1 fs/Cycle Engrais Organique : Non Insecticide Nematicide : Non
Code : RPJ Lieu : Arcahaie-Robert Jo Sol : Alluvions Sdc : jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère Faible intrant Association : Haricots (en début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais chimique : Urée 1fs_complet « NPK » :1 fs/cycle Engrais organique : résidus végétaux Insecticide nematicide : Vydate (pralinage des plants)
Code : KM Lieu: Arcahiae-Cortade Sol : Alluvions SDC : Jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère_ Faible intrant Association : Haricots (en début de cycle) Herbicide : non (désherbage manuel) Engrais chimique : Urée_ complet « NPK », tous les 3 mois Engrais organique : Non Insecticide/nematicide : Vydate (pralinage des plants)
Code : KM' Lieu: Arcahiae-Cortade Sol : Alluvions SDC : Jachère/plantain (French)	Précédent : Jachère _Faible intrant Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais chimique : Urée_complet « NPK », , tous les 3 mois Engrais organique : Non Insecticide/nematicide : Vydate (pralinage), à la plantation
Code : JD Lieu : Arcahiae-Barbancourt Sol : Alluvions SDC : Jachère/plantain (French)	Précédent : Bachère_Faible intrant Association : haricots (en début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais chimique : engrais complet, 1 fois/an Engrais organique : non Insecticide/nématicide : Non

Précédent-banane

Code : AW Lieu: Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : Banane/plantain (French)	Précédent : Banane _Zéro intrant Association : quelques pieds de manioc Herbicide : Non Engrais Chimique : Non Engrais Organique : Non Insecticide Nematicide : Non
Code : PP Lieu : Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : Banane/plantain (French)	Précédent : banane_Zéro intrant Association : haricots (en début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais chimique : Non disponible (trop cher) Engrais organique : non Insecticide nematicide : non
Code : PP' Lieu : Arcahaie-Barbancourt Sol : Alluvions Sdc : plantain/plantain (French)	Précédent : Banane_Faible intrant Herbicide : non (désherbage manuel) Engrais chimique : Urée 1fs_complet « NPK » 1 fois, tous les 2 mois Engrais Organique : Non Insecticide Nematicide : Non
Code : CC Lieu : Arcahaie-Saint Tard Sol : Alluvions Sdc : Plantain/plantain (French)	Précédent : banane _Zéro intrant Association : Haricots (début de cycle) Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais Chimique : Non Engrais Organique : Non Insecticide Nematicide : Non
Code : KJ Lieu: Arcahaie-Robert Jo Sol : Alluvions Sdc : Banane/plantain (French)	Précédent : banane _ Faible intrant Herbicide : Non (désherbage manuel) Engrais Chimique : Complet « NPK » 1 fois, urée 1 fois, 2 fois/cycle Engrais Organique : Non Insecticide Fongicide : Vydate (pralinage des plants)

ANNEXE V

Interventions faites sur la parcelle expérimentale

ITK1 : Plants non sains « Baïonnettes pralinées au grésil » + Herbicides (Basta 3 fois/cycle) + Nématicides/Insecticides (Nematorin 20g/plant à la plantation) + engrais chimiques (Urée_engrais complet, NPK, 100g/plant tous les 2 mois)

ITK2 : Plants non sains « Baïonnettes pralinées au grésil » + Herbicides (Basta : 3 fois/Cycle) + Vermicompost (1,5Kg à la plantation, après 2 mois, 6 mois,…)

ITK3 : Plants non sains « Baïonnettes pralinées au grésil » + PDS (installation *Paspalum notatum* après la plantation ; voir fiche 1) + Nématicides/Insecticides (Nematorin 20g/plant à la plantation) + engrais chimiques (Urée_engrais complet, NPK, 100g/plant tous les 2 mois)

ITK4 : Plants non sains « Baïonnettes pralinées au grésil » + PDS (installation *P. notatum* après la plantation) + Vermicompost (1,5Kg à la plantation, après 2 mois, 6 mois,…)

ITK5 : Plants-sains « PIF » + Herbicides (Basta 3 fois/cycle) + engrais chimiques (engrais complet, urée, NPK, 4 fois/an)

ITK6 : Plants-sains « PIF » + Herbicides (3 fois/cycle) + Vermicompost (1,5Kg à la plantation, après 2 mois, 6 mois,…)

27 plants PIF

ITK7 : Plants-sains « PIF » + PDS (installation *P. notatum* après la plantation) + engrais chimiques (Urée_engrais complet, NPK, 100g/plant tous les 2 mois)

ITK8 : Plants-sains « PIF » + PDS (installation *P.notatum* après la plantation) + Vermicompost (1,5Kg à la plantation, après 2 mois, 6 mois,…)

Tableau 1 : Calendrier des interventions

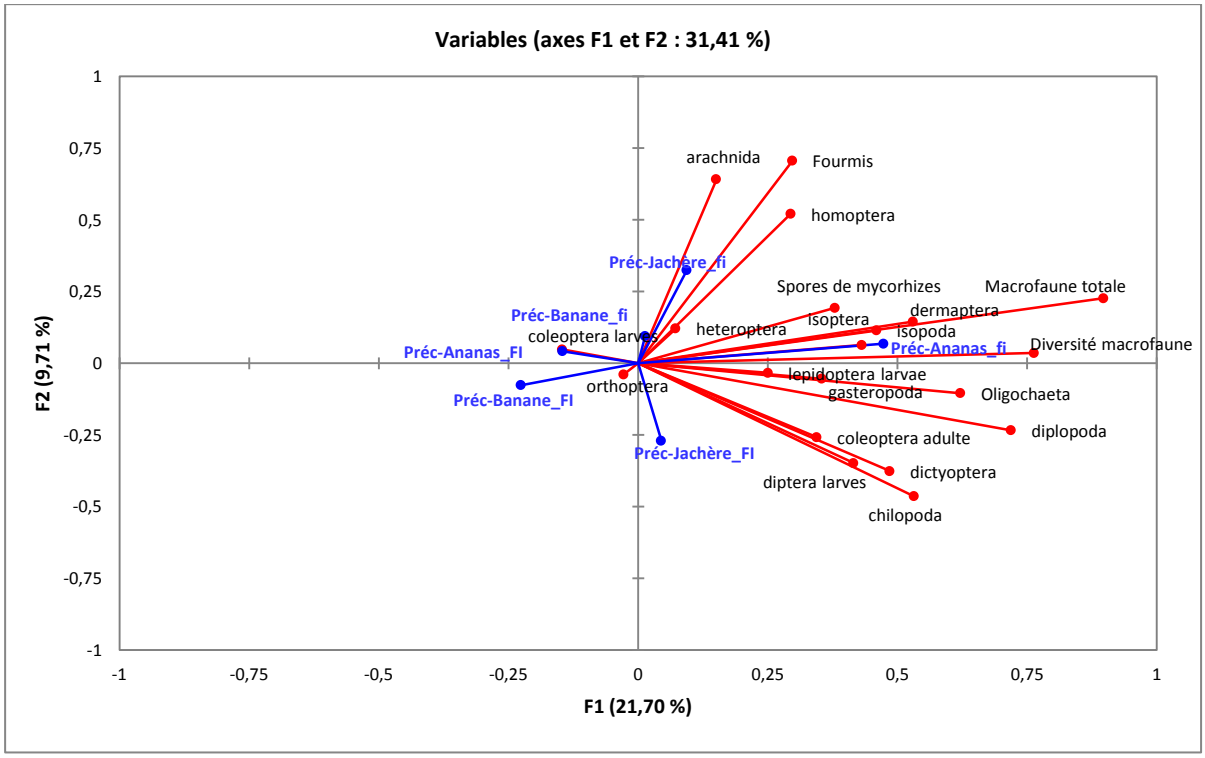
Interventions	Période (Mois_année)
Plantation	Septembre 2012
Apport de Nématorin	Septembre 2012
Apport d'engrais chimique	Sept-12/nov_12/janv_13_avr_13
Apport de Vermicompost	Sept-12/nov_12/janv_13_avr_13
Désherbage chimique	Tous les 3 mois
Prélévements des échantiollons sols/Racines	A la floraison (avril-mai_2013)
Récolte des régimes	Aout-octobre_2013

***Paspalum notatum* (Poacées)**

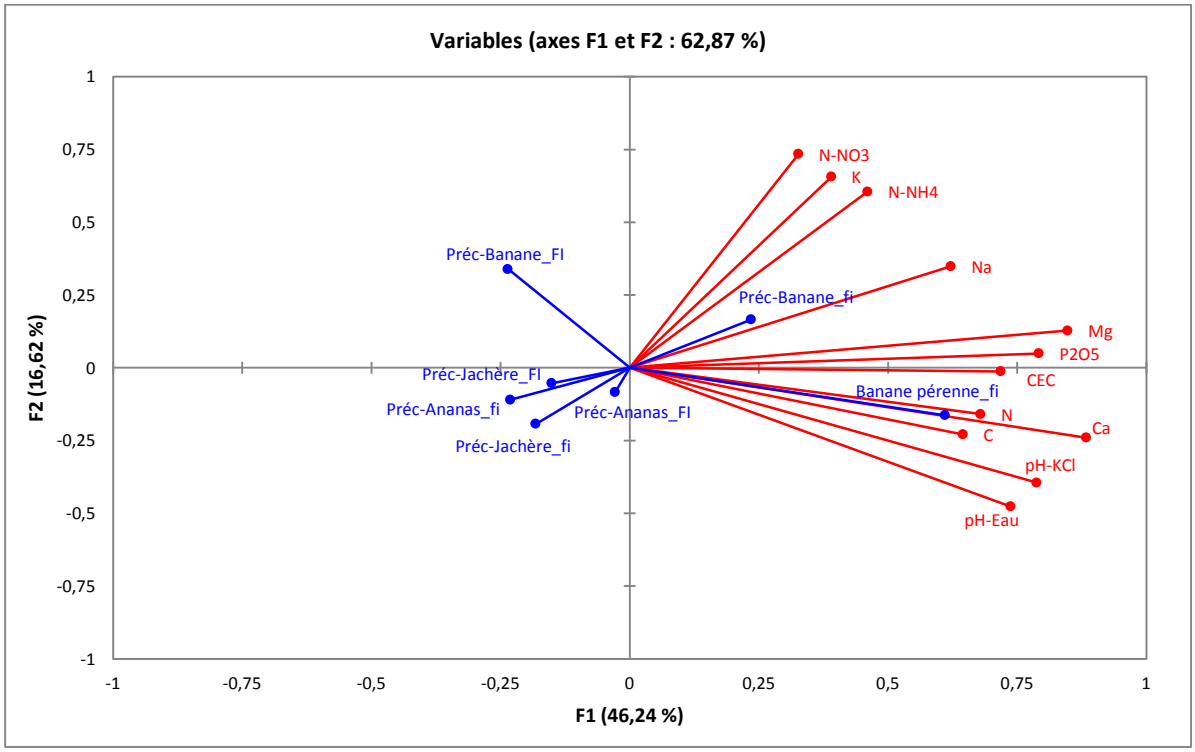
Présence en Guadeloupe : Oui, très commune [2]. Nom vernaculaire, « Bahia grass », « zèb si fimèl », « zèb mouton ».
Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) : De 25°N à 30°S.
Altitude : 0 à 2 000 m.
Biologie, croissance et développement : Appelée communément *Bahia grass*. Plante pérenne à colonisation par stolons et graines. Les stolons sont dotés de racines conséquentes. La croissance est lente lors de l'établissement et s'intensifie dans un deuxième temps tout en restant modérée. Supporte très bien le pâturage et les tailles rases en formant un couvert dense. Bonne capacité de contrôle des adventices (couvert dense) mais seulement une fois établie.
Sol : Adapté à un large spectre de sols avec toutefois une préférence pour les textures sableuses. *P. notatum* est souvent utilisé pour stabiliser les terrasses contre l'érosion.
Eau : Minimum de 750 mm par an, optimum à 1 500 mm. Bonne tolérance à la sécheresse. Tolérance convenable aux excès d'eau.
Température et lumière : Optimum à 25-30°C. Minimum à 8°C. Non adapté aux situations ombragées.
Maladies et ravageurs : Sensible à *Claceps paspali* et dans une moindre mesure à *Helminthosporium micropus*.
Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. : Association possible avec *Trifolium incarnatum* et *Trifolium repens*. Quelques essais validés aussi avec *Trifolium semipilosum et Lotononis bainesii*.

Références bibliographiques :

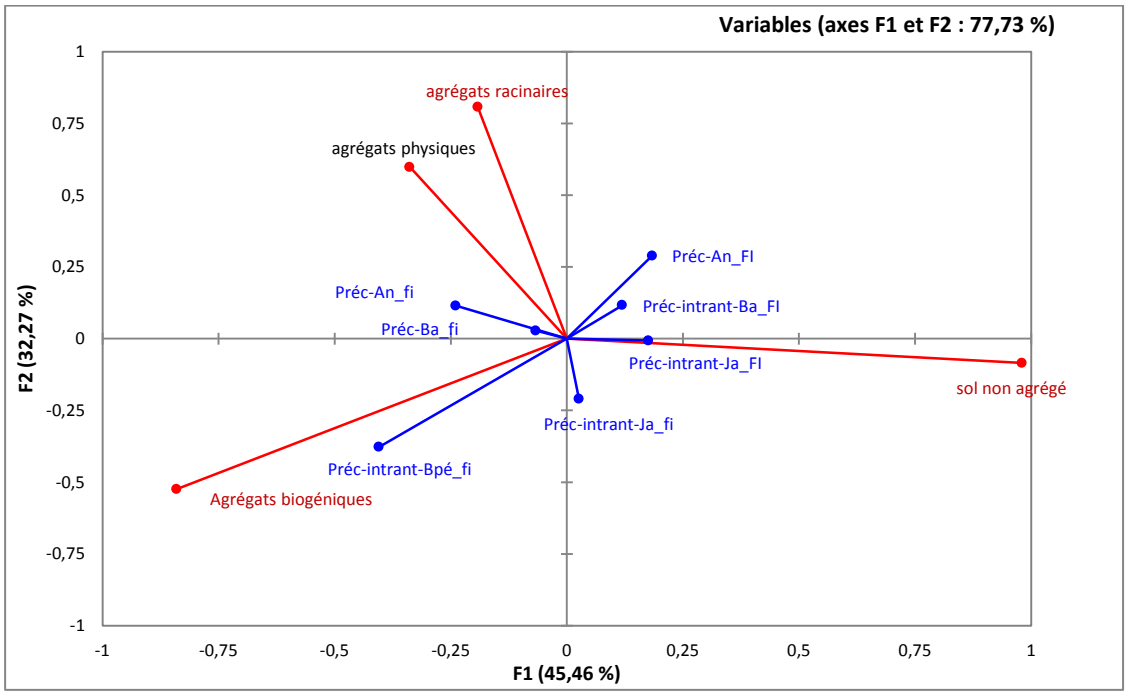
• [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm
• [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2, 1324 p.



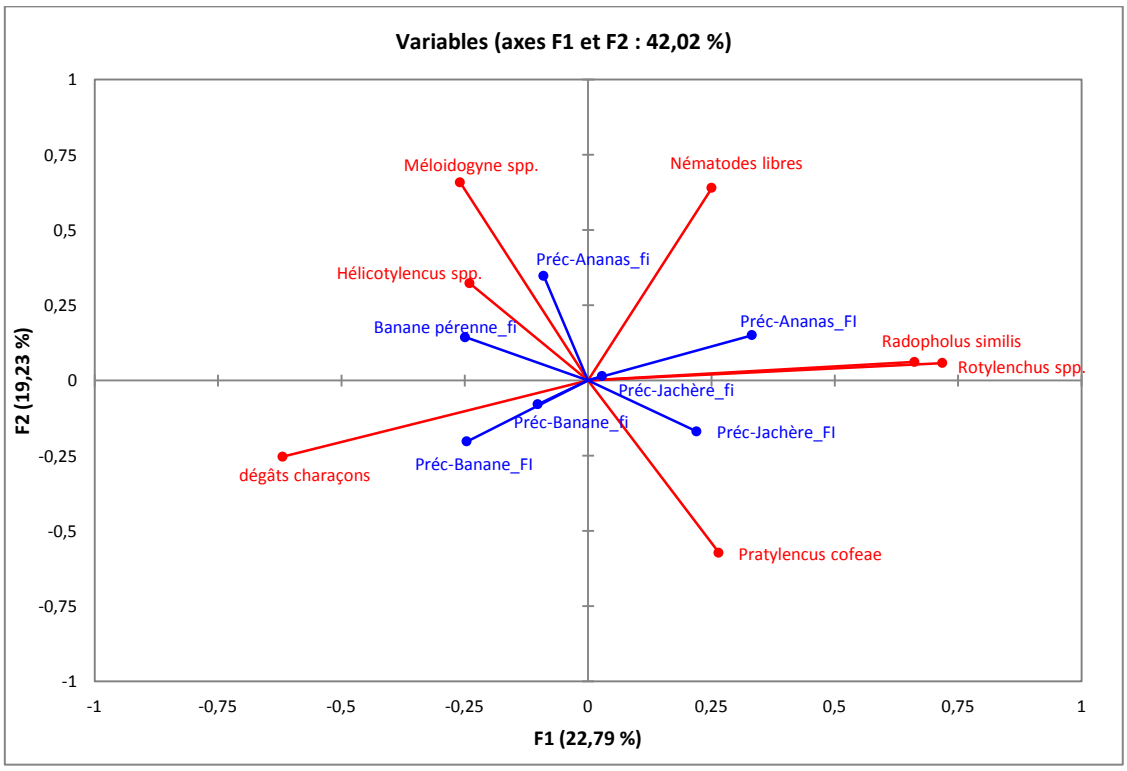
A : Effets des pratiques sur la biologie du sol (Macrofaune et mycorhizes). Préc : précédent, FI : fort intrant, fi : faible intrant.



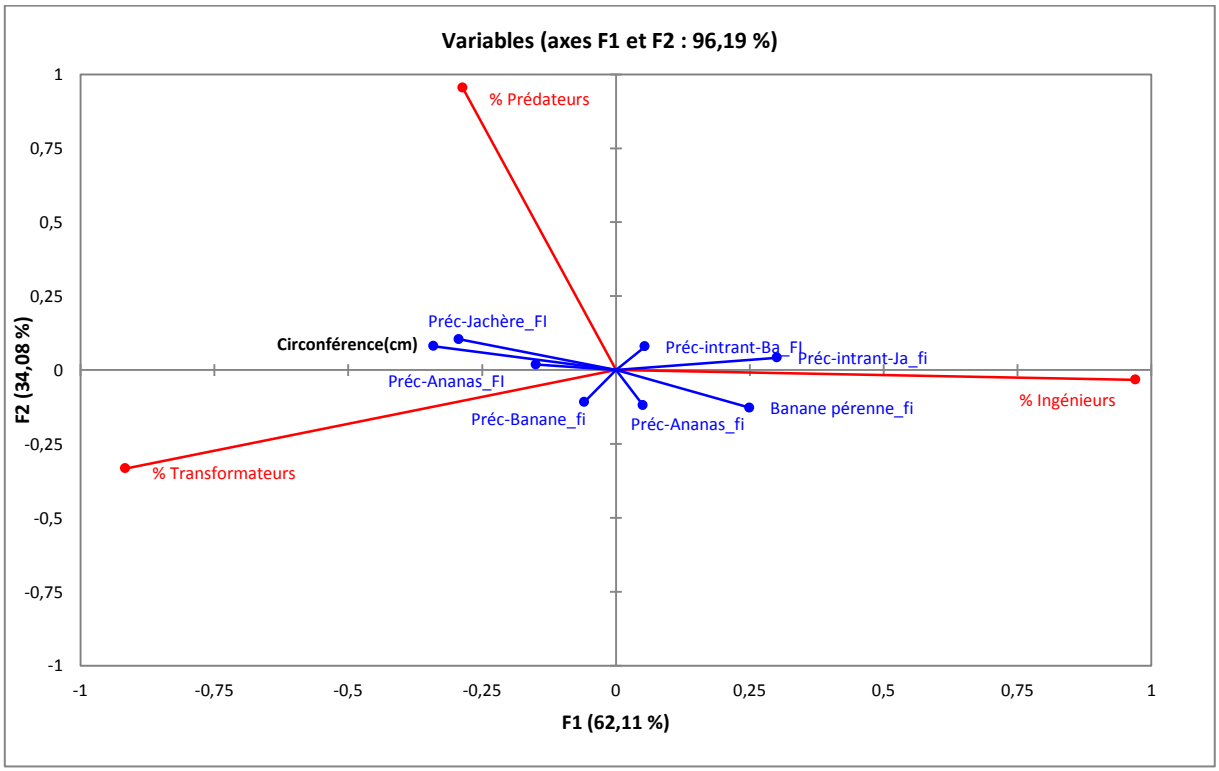
B : Effets des pratiques sur la chimie du sol. Préc : précédent, FI : fort intrant, fi : faible intrant.



C : Effets des pratiques su sur la Morphologie du sol. Préc : précédent, FI : fort intrant, fi : faible intrant.



D : Effets des pratiques sur les nématodes du sol. Préc : précédent, FI : fort intrant, fi : faible intrant.



E : Effets des pratiques su sur les groupes fonctionnels du sol. Préc : précédent, FI : fort intrant, fi : faible intrant.

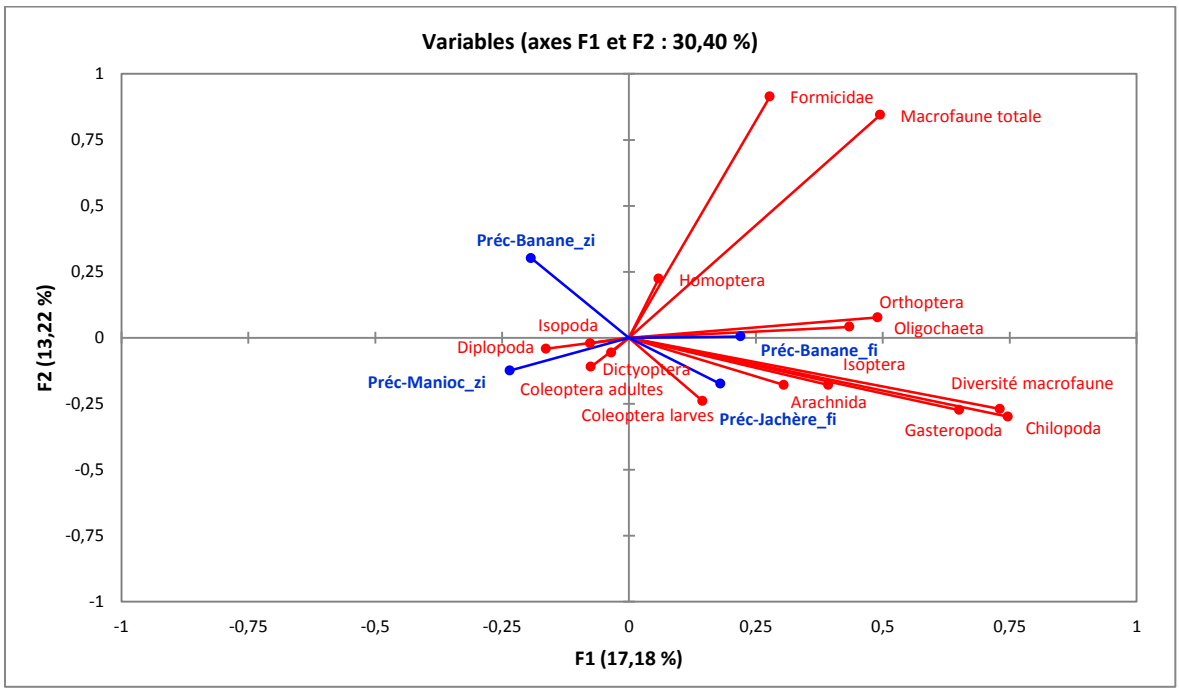
Tableau 1 : Matrice de corrélation (Pearson)

Variables	% Ingénieurs	Pratylenchus cofeae	dégâts charaçons	Radopholus similis	indicateur chimique	% Prédateurs	Circ.(cm)	% Transformateurs
% Ingénieurs	**1**	-0,042	-0,029	0,047	-0,074	**-0,288**	**-0,325**	**-0,825**
Pratylencus cofeae	-0,042	**1**	-0,053	0,112	-0,089	-0,036	-0,140	-0,010
dégâts charaçons	-0,029	-0,053	**1**	-0,134	-0,076	-0,009	-0,173	0,020
Radopholus similis	0,047	0,112	-0,134	**1**	**-0,187**	-0,053	0,163	-0,005
indicateur chimique	-0,074	-0,089	-0,076	**-0,187**	**1**	0,039	0,093	0,035
% Prédateurs	**-0,288**	-0,036	-0,009	-0,053	0,039	**1**	0,177	-0,036
Circonférence(cm)	**-0,325**	-0,140	-0,173	0,163	0,093	0,177	**1**	**0,292**
% Transformateurs	**-0,825**	-0,010	0,020	-0,005	0,035	-0,036	**0,292**	**1**

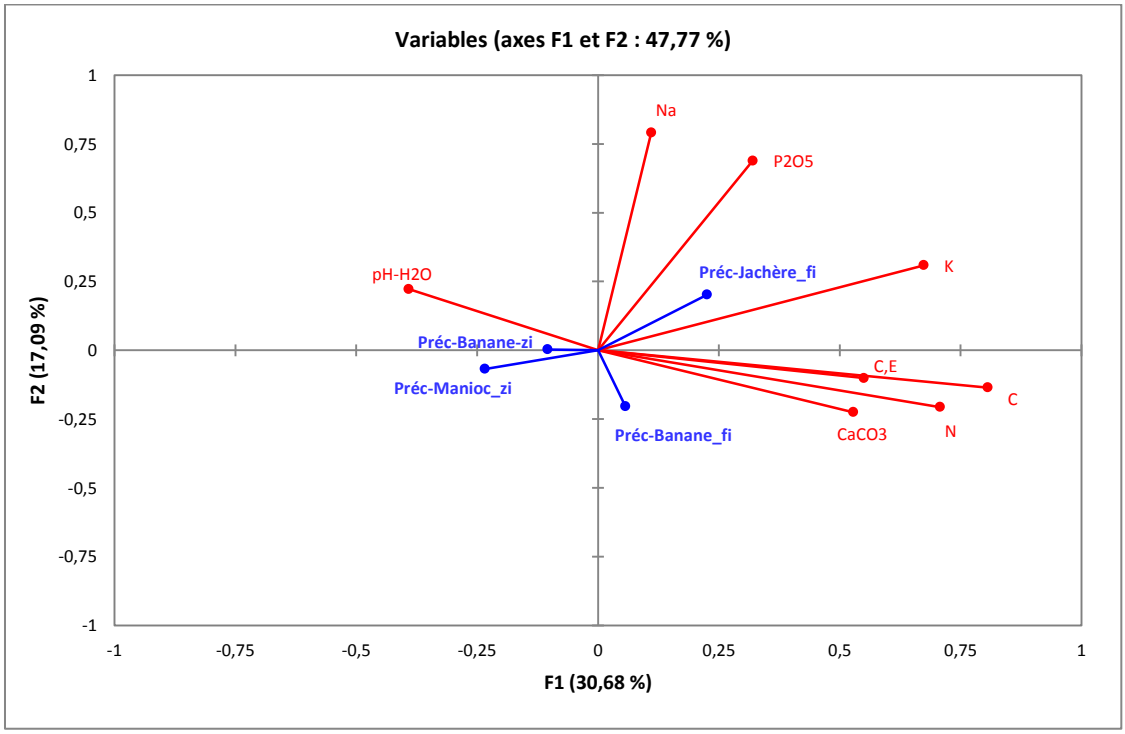
Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

ANNEXE VII

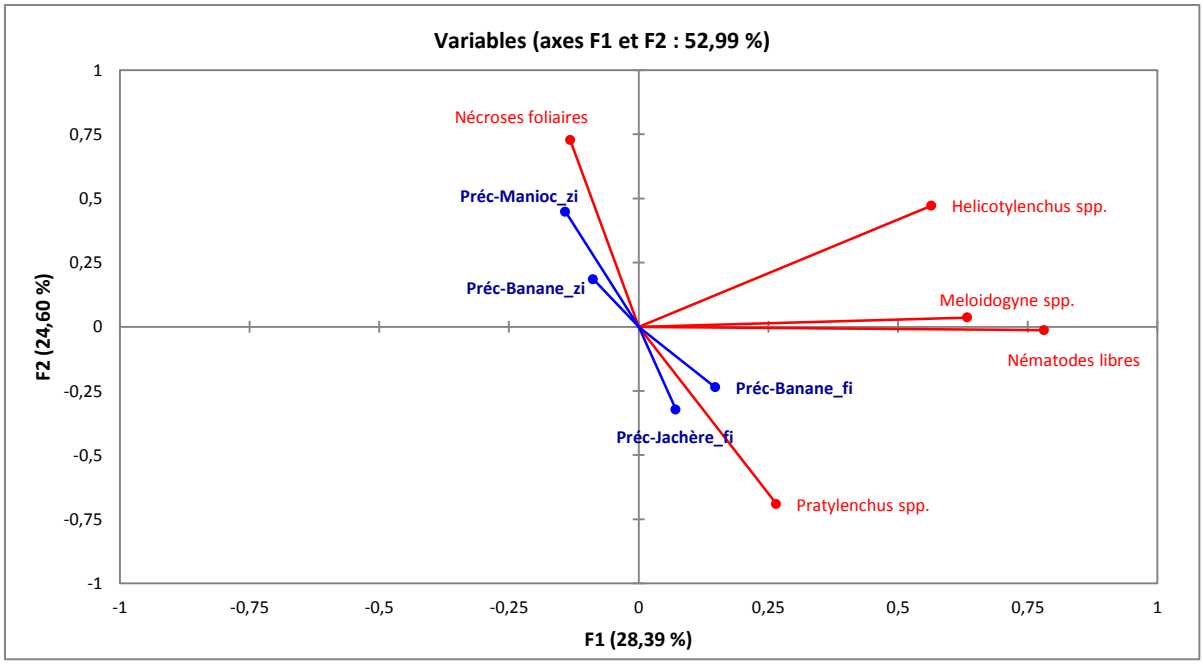
Diagnostic agro-écologique en Haïti



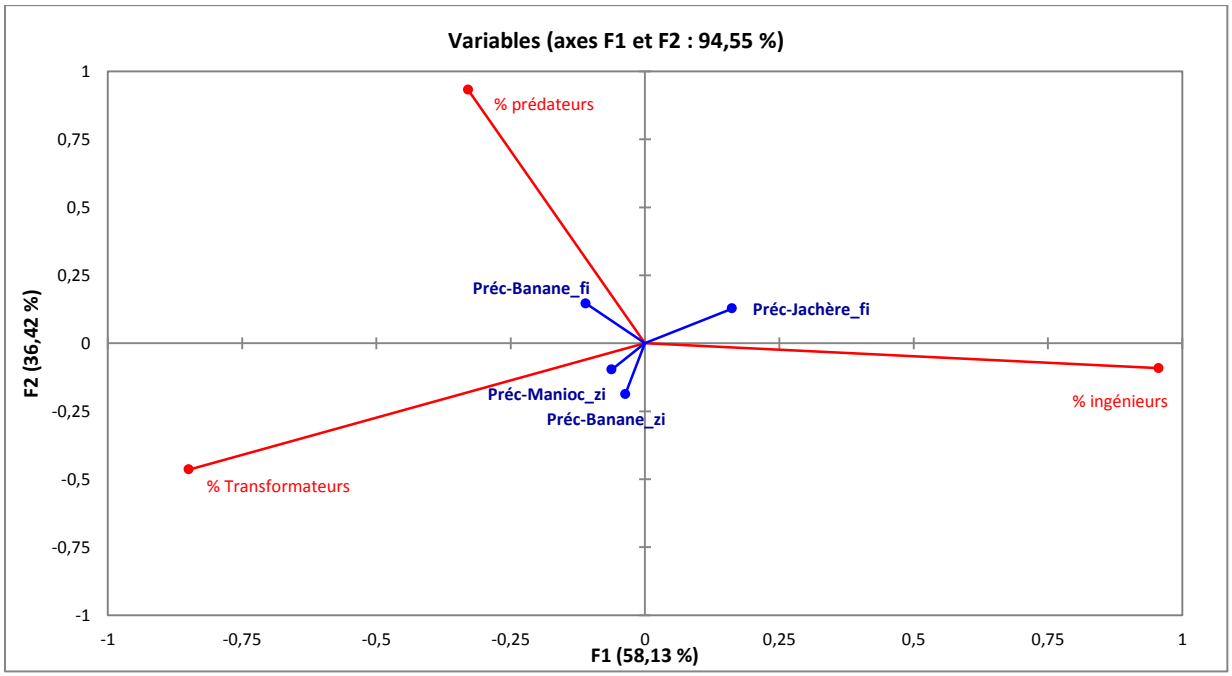
A : Effets des pratiques sur la biologie dans le sol (macrofaune et mycorhizes). Préc : précédent, zi : zéro intrant, fi : faible intrant.



B : Effets des pratiques sur la chimie du sol. Préc : précédent, zi : zéro intrant, fi : faible intrant.



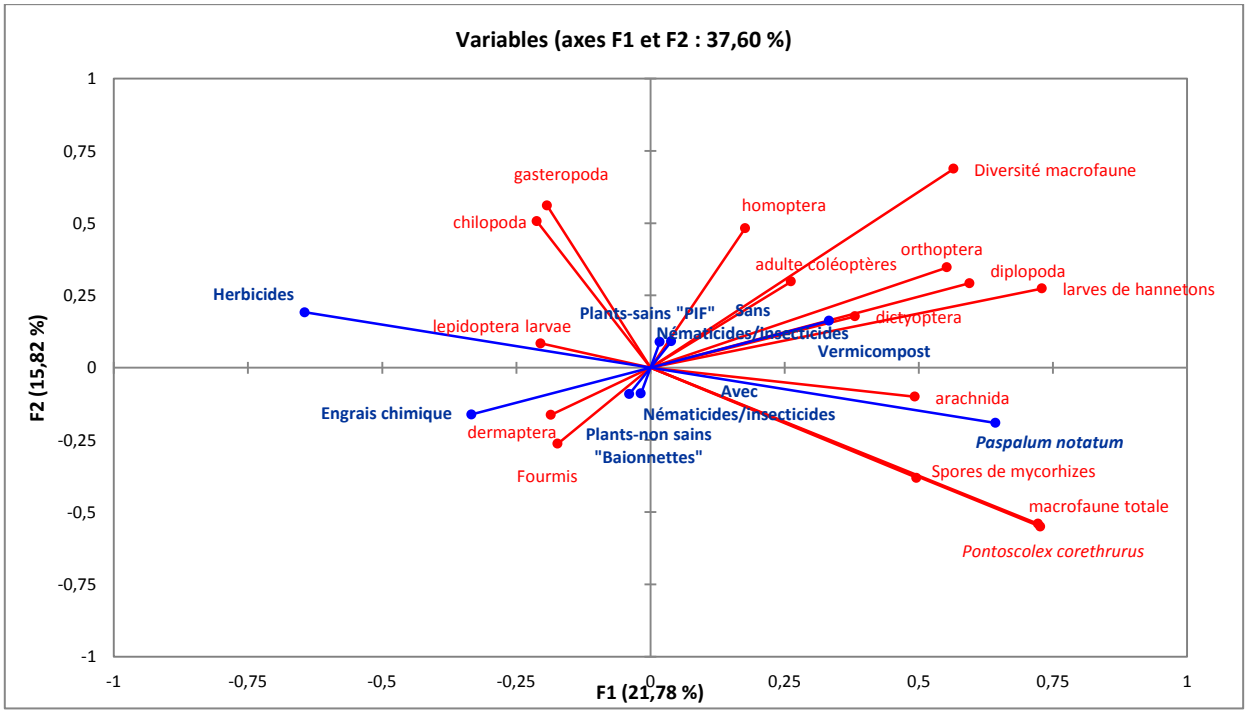
C : Effets des pratiques sur les nématodes du sol. Préc : précédent, zi : zéro intrant, fi : faible intrant.



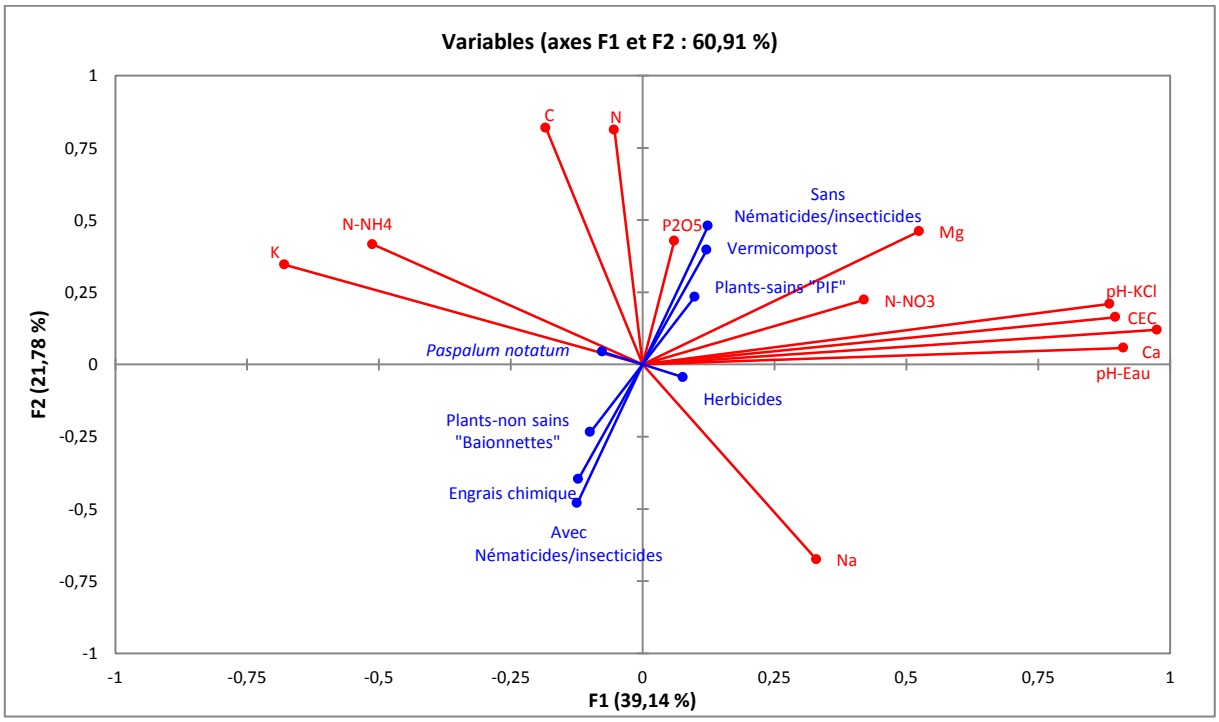
E : Effets des pratiques sur les trois principaux groupes fonctionnels du sol. Préc : précédent, zi : zéro intrant, fi : faible intrant.

ANNEXE VIII

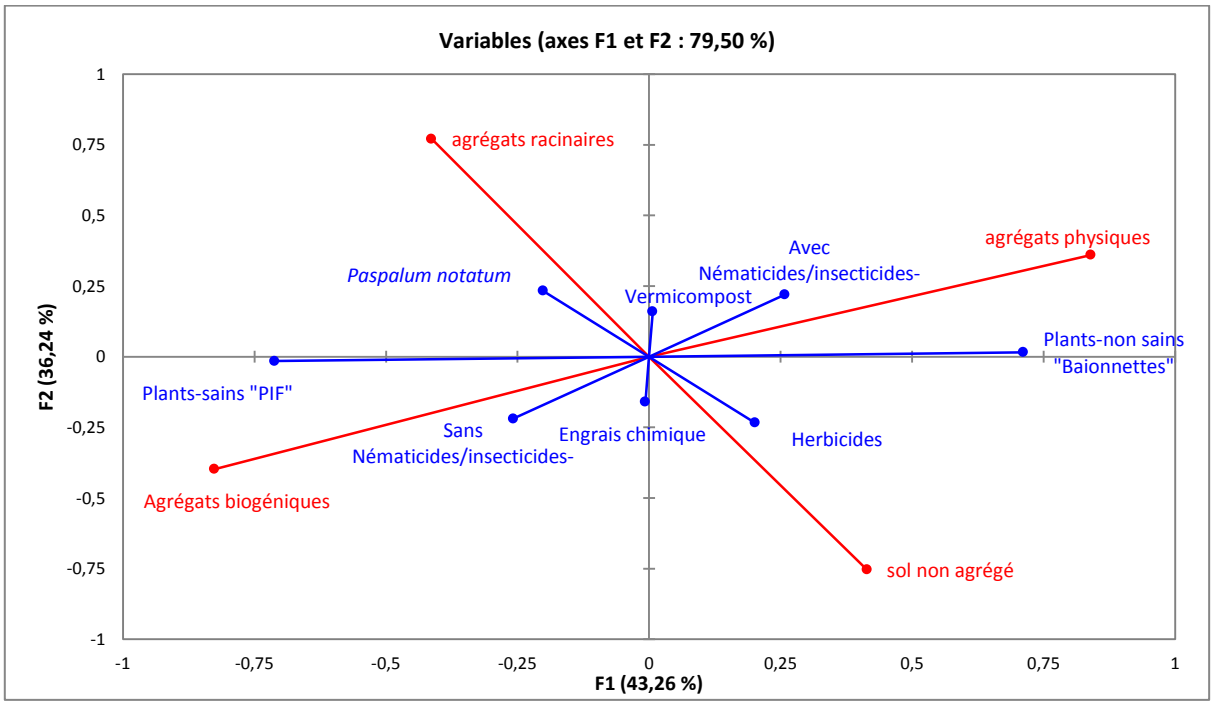
Expérimentation semi-contrôlée en champ



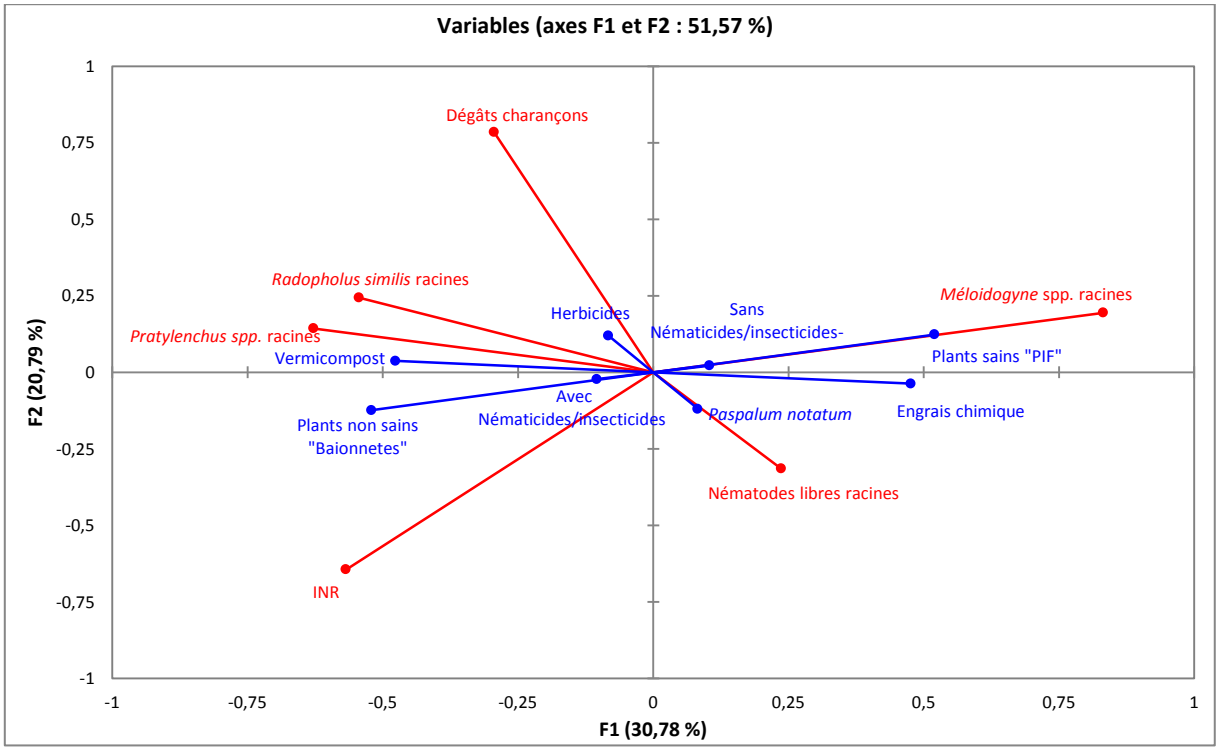
A : Influence des traitements innovants sur la biologie du sol.



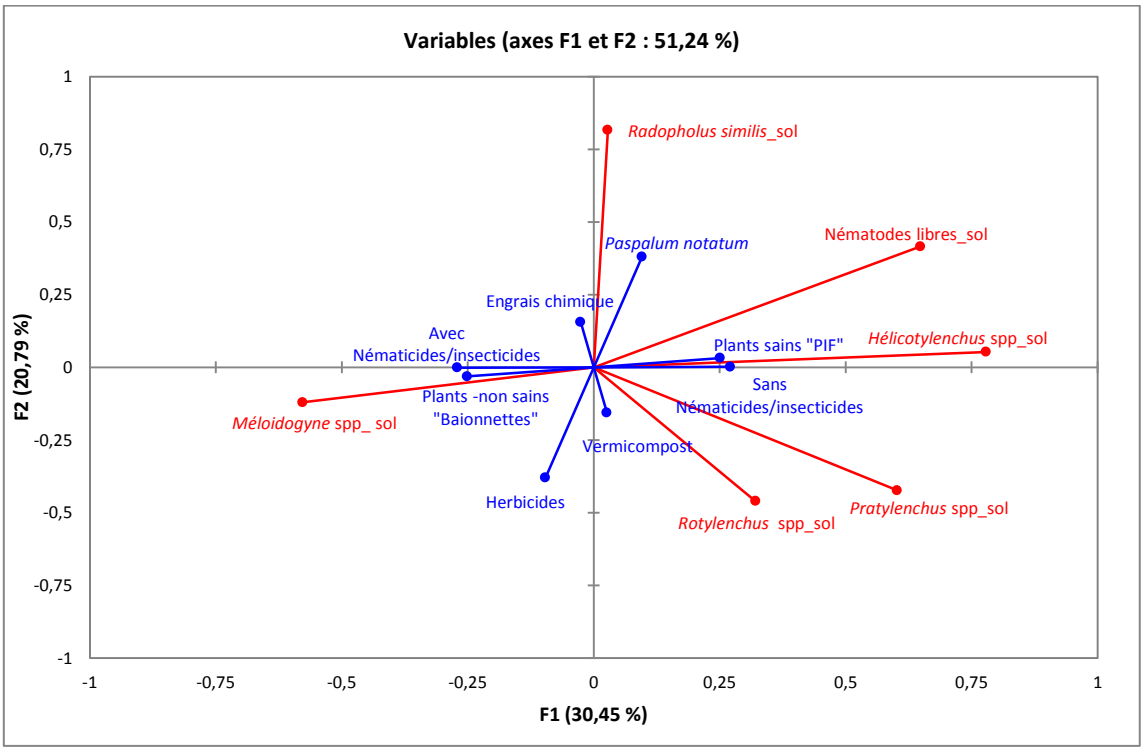
B : Influence des traitements innovants sur la chimie du sol.



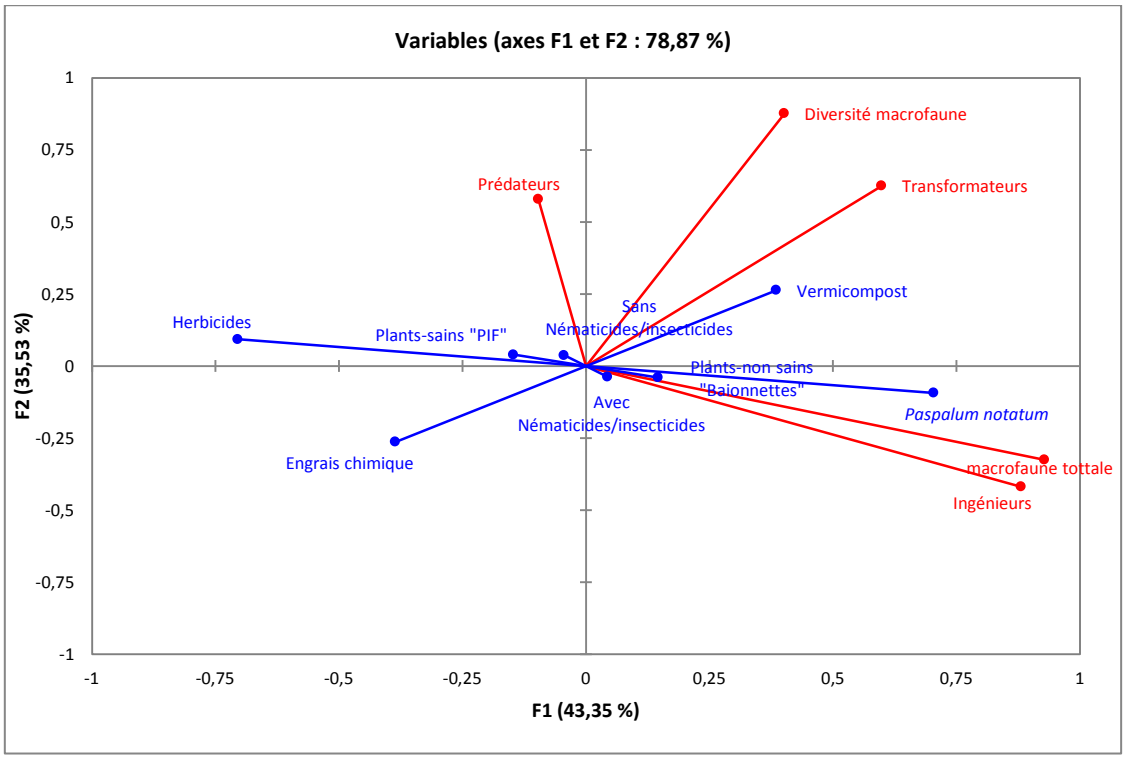
C : Influence des traitements innovants sur la morphologie du sol



D : Influence des traitements innovants sur les nématodes des racines des 2 types de matériel végétal



F : Influence des traitements innovants sur les nématodes du sol



G : Influence des traitements innovants sur la les groupes fonctionnels du sol.