



HAL
open science

Évaluation de la fourniture de services écosystémiques dans des systèmes bananiers innovants conduits en agriculture biologique

Sarah Costes

► **To cite this version:**

Sarah Costes. Évaluation de la fourniture de services écosystémiques dans des systèmes bananiers innovants conduits en agriculture biologique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03788224

HAL Id: dumas-03788224

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03788224>

Submitted on 26 Sep 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR

<p>Année universitaire : 2021 - 2022</p> <p>Spécialité : Horticulture</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p>Protection des Plantes et de l'Environnement en Horticulture - PPEH</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	--

Évaluation de la fourniture de services écosystémiques dans des systèmes bananiers innovants conduits en Agriculture Biologique

Par : Sarah COSTES



Soutenu à Angers le 6 septembre 2022

Devant le jury composé de :

Président : Nicolas CHEN

Autre membre du jury : Gaëlle DAMOUR

Maître de stage : Marie SAUVADET

Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord à ma maîtresse de stage, Marie Sauvadet, pour m'avoir accordée sa confiance et fait de ce stage une expérience formatrice, riche et diversifiée. Merci de m'avoir partagé ton expérience et ta passion.

Je remercie également Pascale Guillermin, ma tutrice d'Agrocampus Ouest, pour sa réactivité et ses conseils.

Merci à Mathieu Coulis, Simon Gibert et Damien Beillouin pour nos échanges enrichissants et leurs conseils précieux à la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à Maurice Alier pour sa bonne humeur et sa patience durant nos campagnes de terrain, autour d'un beerkan et d'un chronomètre. Merci également à Olivier Birba et Joshua Soudes qui m'ont prêté main forte pour déterrer les racines de bananiers. Un grand merci à Eliane Marville, Christiane Mauriol, Jean-José Banidol et Nelly Belliard qui ont participé au traitement des échantillons au laboratoire.

Un très grand merci à Alexis Delaplace pour son écoute et ses bons conseils, pour ses qualités de pédagogue qui m'ont guidée dans l'univers tortueux des statistiques, pour le temps qu'il m'a accordé et son aide précieuse à la réalisation de ce mémoire, pour tous ces souvenirs partagés autour d'un café, d'une rando ou d'une escapade à la découverte des curiosités de l'île.

Un très grand merci à Quentin Gabriac qui a prêté une oreille attentive à mes péripéties martiniquaises tout au long de ma mission, m'a aidée à percer le mystère de l'ACP, m'a appris à manier la bêche, m'a partagé sa passion pour les vers de terres, et m'a accompagnée jusqu'au sommet du Morne Larcher puis de la Pelée.

Un grand merci aux colocs de Moutte, Laure, Léa et Célia, puis Amandine et Julie ; et à toutes ces rencontres ciradiennes et d'ailleurs, Thomas, Théo, Anaïs, Karine, Inès, Pauline, Meryem, David, Alexis, Chloé, Swann, Mathilde, Sophie et Camille.

Un clin d'œil aux copains de promo, d'Aveyron, d'ERASMUS et d'ailleurs, qui sont loin des yeux mais près du cœur.

Merci à mon frère, Thomas, sans qui je ne serai pas la personne que je suis devenue aujourd'hui. Merci pour ton écoute, ton soutien et tes conseils, merci d'être là pour guider mes choix, accompagner mes projets et m'aider à réaliser mes rêves.

Merci à mes parents et mes frères qui ont été les premiers à me soutenir et à développer mon envie d'apprendre, de comprendre le monde et d'œuvrer pour le changer.

TABLE DES MATIÈRES

I - INTRODUCTION	1
1. Contexte de l'étude.....	1
2. État de l'art	5
3. Objectifs et hypothèses de l'étude.....	13
II - MATÉRIEL & MÉTHODES	14
1. Contexte pédoclimatique	14
2. Présentation du dispositif expérimental.....	15
3. Conduite culturale des systèmes étudiés	16
4. Méthodes d'évaluation des systèmes.....	17
III – RÉSULTATS	22
1. Maintien de la structure du sol.....	22
2. Stockage de carbone dans le sol	22
3. Biomasse de couvert enherbé restituée	22
4. Régulation des bioagresseurs	23
5. Rendement	23
6. Analyse croisée des indicateurs étudiés.....	23
IV – DISCUSSION	24
1. Impacts de la conversion des systèmes bananiers à l'AB sur la provision de SE	24
2. Impacts de l'introduction d'arbres dans les systèmes bananiers biologiques sur la fourniture de SE	27
3. Synthèse des forces et faiblesses soulevées par l'étude de ces trois systèmes.....	29
V – LIMITES ET PERSPECTIVES	31
1. Les limites du dispositif expérimental	31
2. Un dispositif expérimental encore jeune.....	31
3. Une analyse économique indispensable à la valorisation des travaux.....	31
VI – CONCLUSION	32

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AB : Agriculture Biologique

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIC : Critère d'Information d'Akaïke

BI : système Biologique Intensif

BD : système Biologique Diversifié

BGM : Banane de Guadeloupe et Martinique

CO : système COnventionnel

DAAF : Direction de l'Agriculture de l'Alimentation et de la Forêt

GES : Gaz à Effet de Serre

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

IT2 : Institut Technique Tropical

MEA : Millenium Ecosystem Assessment

MO : Matières Organiques

OP : Organisations de Producteurs

PBD : Plan Banane Durable

SAU : Surface Agricole Utile

SE : Services Écosystémiques

UE : Union Européenne

TABLE DES FIGURES

- Figure 1 : Production mondiale de bananes par pays en millions de tonnes
- Figure 2 : Répartition des surfaces des principaux marchés exportateurs de bananes
- Figure 3 : Principaux marchés importateurs de bananes dans le monde
- Figure 4 : La France premier ré-exportateur européen de bananes
- Figure 5 : Réduction de l'usage de produits phytosanitaires après le déploiement des PBD
- Figure 6 : Schéma d'un bananier à la fructification et de ses rejets
- Figure 7 : Succession dans le temps des différents stades de développement du bananier
- Figure 8 : Conduite de la culture de bananiers
- Figure 9 : Schéma d'un système bananier planté en double-rang
- Figure 10 : Les systèmes bananiers soumis à diverses pressions bioagresseurs
- Figure 11 : Charançon du bananier *C. sordidus*
- Figure 12 : Cycle de vie du charançon du bananier *C. sordidus*
- Figure 13 : Dégâts de larves de charançons *C. sordidus* dans un bulbe de bananiers
- Figure 14 : Dessin d'observation de *R. similis* : femelle (A) et mâle (B)
- Figure 15 : Cycle de vie de *R. similis*
- Figure 16 : Nécroses racinaires chez le bananier causées par les nématodes phytophages
- Figure 17 : Cycle du carbone dans le sol
- Figure 18 : Composantes naturelles du système bananiers à l'origine de la fourniture de SE
- Figure 19 : Pluviométrie en Martinique
- Figure 20 : Types de sol en Martinique
- Figure 21 : Répartition de la SAU des bananeraies en Martinique
- Figure 22 : Localisation du dispositif BANABIO en Martinique
- Figure 23 : (a) Plan de plantation des systèmes CO et BI (b) du système BD
- Figure 24 : Plan du dispositif BANABIO
- Figure 25 : Détail des indicateurs étudiés par composante naturelle du système bananier
- Figure 26 : Mesure de l'infiltrabilité du sol suivant la méthode Beerkan
- Figure 27 : Stratégie d'échantillonnage des (a) systèmes CO et BI (b) du système BD
- Figure 28 : Résultats des mesures d'infiltrabilité du sol en fonction des systèmes
- Figure 29 : (a) Résultats des mesures de teneurs en carbone du sol en fonction des systèmes (b) Stockage de carbone en fonction des systèmes
- Figure 30 : (a) Résultats des mesures de restitutions de biomasse du couvert herbacé par destruction (b) et par cycle en fonction des systèmes
- Figure 31 : Résultats de l'abondance de charançons par piège en fonction des systèmes
- Figure 32 : (a) Résultats du poids moyen des régimes (b) Rendement dans les systèmes
- Figure 33 : (a) ACP des indicateurs (b) Cercle de corrélation
- Figure 34 : Données climatiques du site expérimental de BANABIO de 1997 à 2007
- Figure 35 : Classes d'infiltrabilité

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Conduite culturale des trois systèmes étudiés

TABLE DES ANNEXES

Annexe I - Histoire et origine du concept de services écosystémiques

Annexe II - Données climatiques du site expérimental

Annexe III - Protocole détaillé d'extraction des nématodes

Annexe IV - Scripts R et sorties consoles des analyses statistiques

Annexe V - Classes d'infiltrabilité du sol

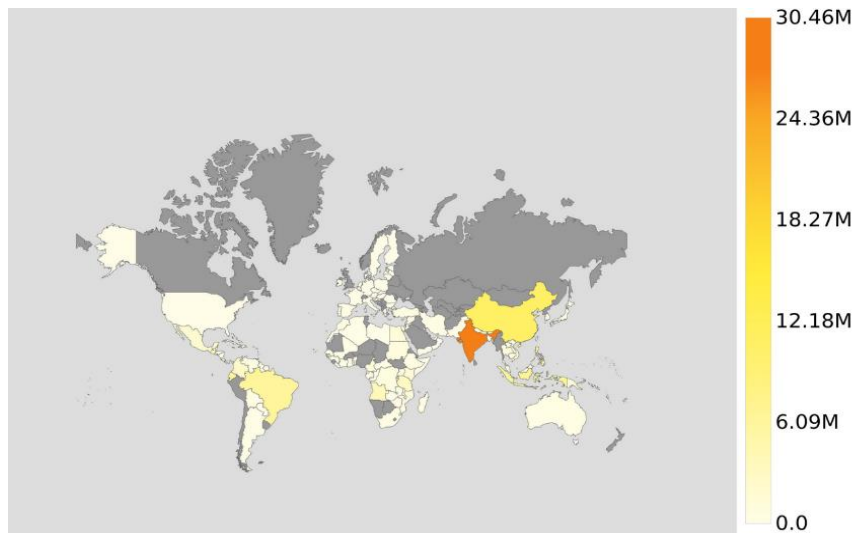


Figure 1 : Production mondiale de bananes par pays en millions de tonnes (FAO Stats 2019)

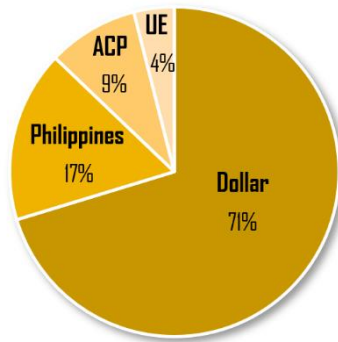


Figure 2 : Répartition des surfaces des principaux marchés exportateurs de bananes dans le monde (D'après FAO, CIRAD 2017)

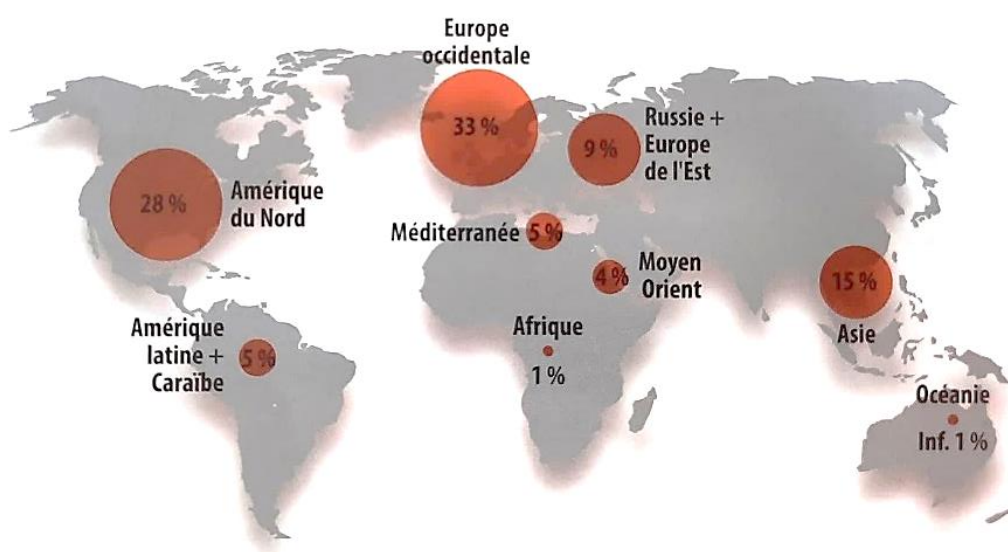


Figure 3 : Principaux marchés importateurs de bananes dans le monde (FAO, CIRAD 2017)

I - INTRODUCTION

1. Contexte de l'étude

a. Contexte économique de la production de bananes

L'organisation du marché mondial de la banane

Chaque année dans le monde ce sont près de 134 millions de tonnes de bananes qui sont produites, dont 62 millions de tonnes de bananes desserts, de variété Cavendish. La banane est le fruit le plus exporté dans le monde. Les principaux pays producteurs sont l'Inde et la Chine (FAO, 2019) (Figure 1), cependant ces nations produisent à destination de leur marché local et ne participent pas au commerce d'exportation à l'international.

En effet, celui-ci met en concurrence tout d'abord le marché des bananes « dollar » qui occupent le rang de leader sur le marché mondial et qui regroupe les bananes commercialisées par des firmes multinationales latino-américaines dont les principaux pays producteurs sont l'Équateur et le Costa Rica. Les Philippines occupent le second rang, suivies par les bananes d'origines ACP (Afrique-Caraïbes-Pacifique). Enfin, en bout de file, se place l'offre communautaire portée et protégée par les pays membres de l'Union Européenne (UE), et dont la production est notamment localisée dans les Antilles françaises (Martinique et Guadeloupe) (Figure 2).

▪ **La concurrence des bananes dollars sur les marchés d'exportations nationaux et européens**

À ce titre, le marché mondial d'exportation est donc dominé par la concurrence des bananes dollars, notamment l'Équateur, leader mondial, avec près de 7 000 000 tonnes exportées en 2021, suivi par le Costa Rica qui affiche 2 500 000 tonnes exportées la même année.

Il en est de même sur le marché européen, où la banane dollar continue de gagner du terrain, encouragée par le passage d'un régime de contingentement des importations à une politique de tarification simple qui permet à l'importation des bananes dollars de bénéficier désormais d'un droit de douane réduit. En 2021, les bananes dollars détiennent ainsi 74.3% des parts de marché de l'UE, se positionnant loin devant les bananes d'origines ACP et la production communautaire portée par l'UE qui plafonnent respectivement à 16.1% et 9.6% (Loeillet, 2022).

▪ **L'Europe occidentale principale région importatrice de bananes dans le monde**

L'Europe occidentale est la principale région importatrice de bananes dans le monde (Figure 3) et consomme six millions de tonnes par an. En 2020, l'UE, le Royaume Uni, la Suisse et la Norvège comptent pour 34% des importations, devant les États-Unis et le Canada qui affichent un taux d'importation de 23% (Loeillet, 2022).

▪ **La France une plaque tournante du commerce européen de la banane**

La France n'occupe que la cinquième place du marché européen en termes de volumes de bananes importés, mais est le premier ré-exportateur européen. En effet, elle joue un rôle de plaque tournante avec près de 300 000 tonnes réexportées par an depuis notamment les Antilles françaises vers l'Europe de l'Est et du Sud (Figure 4).

Quid de la production de bananes dans les Antilles

Ce sont dans les Antilles françaises, en Martinique et Guadeloupe, que sont produites les bananes françaises. La culture de la banane s'y est développée à la fin des années 1930. À ce jour, les deux îles comptent quelques 600 planteurs qui produisent environ 250 000 tonnes chaque année. Placé au rang de premier employeur privé de Guadeloupe et Martinique, le secteur de la banane emploie directement 6000 travailleurs et est à l'origine de 10 000 emplois indirects et induits (CIRAD, 2021), soit 63 % de la main d'œuvre agricole (Loeillet, 2017). Les planteurs se sont structurés pour former la filière de Bananes de Guadeloupe et Martinique (BGM), qui regroupe l'offre en bananes provenant des Antilles françaises. Celle-ci couvre 23%

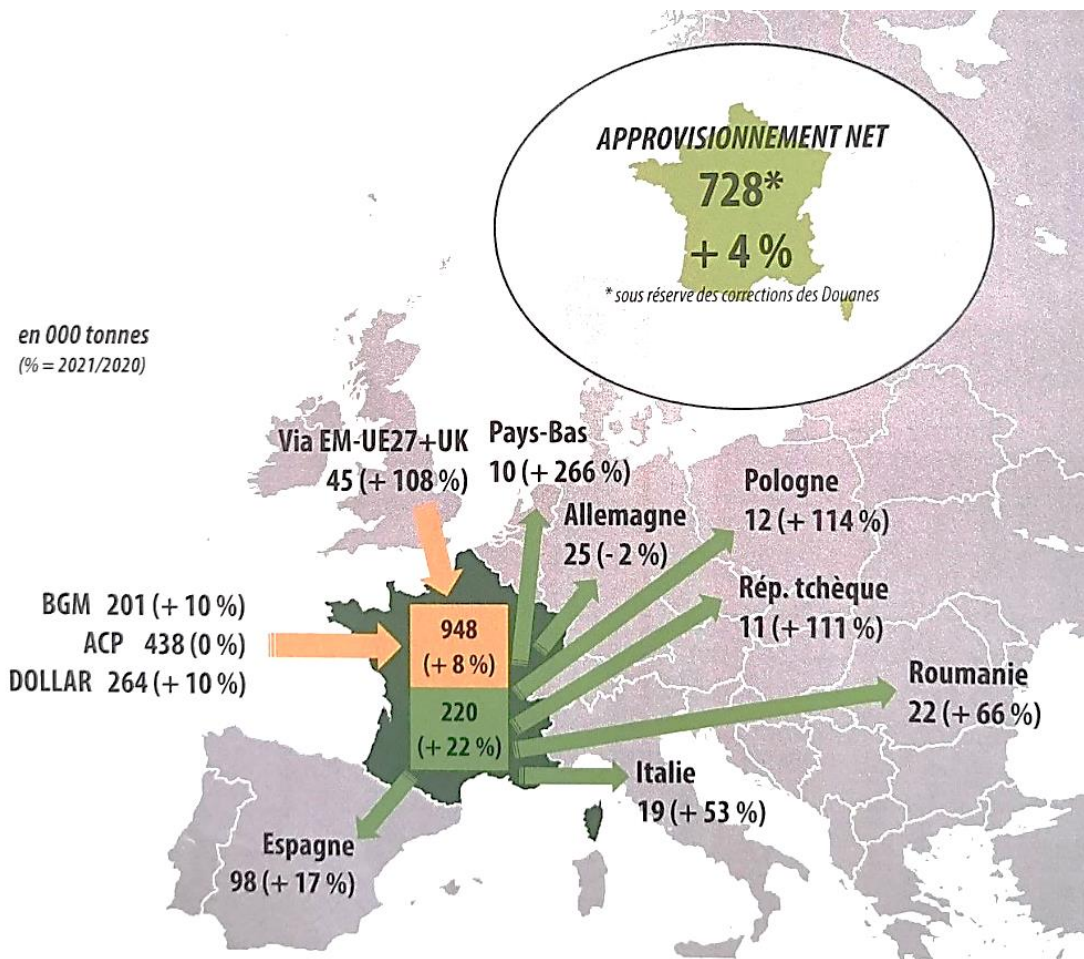


Figure 4 : La France premier ré-exportateur européen de bananes (Loeillet, 2022)

des besoins nationaux, mais ce chiffre est cependant en nette diminution suite aux épisodes cycloniques des années 2017 et 2018 couplés à la forte exposition du marché français à la concurrence de la banane dollar et ACP, avant lesquels la production française assurait le tiers des besoins (Loeillet 2022). En effet, alors que les territoires français producteurs de bananes souffrent des contraintes climatiques et de pression bioagresseurs, du durcissement du cadre réglementaire, de la baisse de la valeur ajoutée sur le marché européen et du glissement des coûts de production, la filière BGM peine à trouver sa place sur le marché français.

- **La Martinique premier territoire producteur de bananes dans les DOM**

La Martinique se hisse, quant à elle, au rang de premier producteur de bananes dans les DOM avec 180 000 tonnes produites par an en moyenne (Agreste 2021, recensement de 2020), et de second producteur européen. Les bananeraies occupent 25% de la Surface Agricole Utile (SAU) de l'île et représentent 50% de la valeur de la production agricole du territoire. Le marché de l'export est dominé par les grandes exploitations (Agreste 2021, recensement de 2020). En 2018, l'île comptait 359 planteurs (Chambre d'Agriculture de la Martinique, 2018). La filière bananes desserts est donc une des principales filières agricoles de la Martinique et un des poumons économiques majeurs de l'île.

Banamart est l'unique organisation de planteurs martiniquais ; les exportations passent ensuite toutes par le même canal de commercialisation, l'Union des Producteurs de Bananes de Guadeloupe et Martinique (UGPBAN), qui fédère depuis 2003 l'ensemble des planteurs des Antilles françaises. L'UGPBAN leur permet de défendre leurs intérêts commerciaux face à leurs concurrents d'Amérique Centrale ou d'Afrique, qui contrairement aux planteurs antillais ne sont pas soumis à la législation européenne, qui pose un cadre réglementaire de plus en plus strict.

b. L'établissement d'un modèle de culture de la banane plus durable dans les Antilles

Une stratégie de protection des cultures bananières longtemps basée sur le recours aux pesticides

En Martinique, la gestion des bioagresseurs a longtemps fait l'objet d'un recours systématique aux produits phytosanitaires. Un des principaux bioagresseurs du bananier, le charançon *Cosmopolites sordidus*, était combattu par lutte insecticide à l'aide du chlordécone (famille des organochlorés) (Vilardebo *et al.*, 1974) ; un autre type de bioagresseur, les nématodes phytophages, étaient maîtrisés par nématicides (organo-phosphorés et carbamates) à raison de deux à trois traitements par an. En 1996, les bananeraies ont alors reçu 950 tonnes de nématicides, comptant pour 74% des produits phytosanitaires utilisés sur l'île (Chabrier *et al.*, 2005b). Par ailleurs, des pulvérisations aériennes de fongicides permettaient de lutter contre la cercosporiose noire, autre bioagresseur important des bananeraies. Enfin, la gestion de l'enherbement reposait sur l'utilisation d'herbicides allant jusqu'à trois applications par an en moyenne (Enquête DAAF, 2016) ; s'ajoutait à cela une gestion de la fertilisation basée sur des apports d'engrais de synthèse.

Les systèmes bananiers conventionnels : un bilan environnemental négatif

En conséquence, ces systèmes bananiers intensifs mono-spécifiques ont causé dans les Antilles des dégradations des milieux cultivés et naturels -sol et eau- sur les plans chimiques, physiques ou biologiques, affectant en conséquence les biotopes terrestres et aquatiques, et l'humain (Risède et Tezenas du Montcel, 1997). Les répercussions des modes de culture productivistes impactent directement la qualité des sols et la gestion des bioagresseurs, rendant ces agrosystèmes de moins en moins performants (Delvaux *et al.*, 1990 ; Dorel et Perrier, 1990). Effectivement, la monoculture intensive de bananes sur sol nu, notamment sur des versants accidentés -reliefs caractéristiques des bananeraies en Martinique-, amplifie le phénomène d'érosion hydrique dû aux pluies tropicales (Khamsouk et Roose, 2003). D'autre part, la surexploitation des terres agricoles a un impact négatif sur les teneurs en Matières Organiques (MO) des sols, diminuant leur fertilité, conséquence directe de la modification de la structure du

sol responsable d'une faible macroporosité et d'une conductivité hydraulique réduite (Dorel, 2001). En outre, l'utilisation systématique de produits phytopharmaceutiques entraîne une perte d'efficacité progressive des molécules mobilisées, notamment due à l'apparition de résistances chez les bioagresseurs visés. Le champ d'action par application de produits phytosanitaires se réduit donc, alors que les planteurs assistent au développement aggravé des symptômes. Le recours systématique aux produits phytosanitaires pour gérer les bioagresseurs des bananeraies a également engendré des pollutions environnementales sans précédent et des scandales sanitaires largement médiatisés.

Le chlordécone en proie au scandale

À ce titre, le chlordécone, insecticide appliqué contre le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus*, a été massivement déployé dans les Antilles de 1972 à 1993. La persistance de cette molécule, qui se retrouve piégée dans les sols volcaniques antillais durant un à plusieurs siècles selon le type de sol (Cabidoche *et al.*, 2009), entraîne une contamination des végétaux (Clostre *et al.*, 2014) et des eaux de ruissellement jusqu'à la mer (Dorel *et al.*, 1996), rayonnant aux réseaux trophiques terrestres et marins (Dromard *et al.*, 2016).

Pourtant interdite depuis 2009 par la convention de Stockholm sur les polluants persistants, les conséquences toxicologiques d'une exposition chronique à cette molécule -notamment via l'alimentation- continuent de frapper la population antillaise, provoquant entre autres un risque accru de cancer de la prostate (Multigner *et al.*, 2010) ou une perturbation du développement chez les jeunes enfants. La dépollution artificielle n'est actuellement pas opérationnelle (Cabidoche *et al.*, 2009). Le chlordécone rend alors impropre certaines zones à la culture, notamment de légumes racines et tubercules qui absorbent ce polluant (Achard *et al.*, 2007). On estime en effet que près de deux cinquièmes de la SAU totale martiniquaise est toujours polluée par le chlordécone.

En 2007, le scandale éclate au grand jour alors que le Grenelle de l'environnement bat son plein. L'affaire est largement médiatisée, mobilisant les populations locales et les producteurs jusqu'à la sphère politique des pouvoirs publics et décideurs. Les planteurs sont pointés du doigt. Cette crise marque un tournant déterminant pour la filière BGM, qui questionne alors le devenir des modes de production conventionnels de la banane Cavendish dans les Antilles françaises, où espaces agricoles et zones d'habitations sont étroitement mêlés.

Évolution du cadre réglementaire en faveur de l'émergence d'un modèle de culture de la banane plus durable

La même année, à l'issue des débats tenus lors du Grenelle de l'environnement, les accords conclus encouragent une mobilisation nationale et sur le long terme quant à la transition vers des modèles agricoles plus durables. En ce sens, dans un contexte de prise de conscience globale des problématiques environnementales et en réponse au constat dressé précédemment, le plan Écophyto est lancé en 2008, affichant un objectif de réduction de 50% de l'utilisation de produits phytosanitaires dans les cultures pour l'horizon 2018. Mis à jour en 2015 avec Écophyto II, le délai est repoussé à 2025. En parallèle, la réglementation sur les matières actives utilisables en agriculture se fait de plus en plus stricte, avec le retrait progressif jusqu'à l'interdiction de nombreuses molécules, notamment plusieurs insecticides, nématicides et herbicides utilisés en bananeraie (réglementation (CE) n° 1107/2009 du 21 octobre 2009). Le plan Écophyto encadre, par exemple, la sortie du glyphosate -herbicide utilisé dans les bananeraies- définie pour 2022 pour l'ensemble des usages (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2022), sujet d'ailleurs largement médiatisé dont la remise en question fait la une des actualités.

Les Plans Banane Durable ou l'impulsion d'un nouveau modèle de culture de la banane antillaise

Dans ce sens, en réponse à un contexte économique et environnemental en pleine mutation, le premier plan Banane Durable (PBD) est lancé en 2007, bientôt suivi par le second PBD en 2015 et le troisième en 2019. Initié par le CIRAD et l'ensemble des acteurs de la filière banane dans

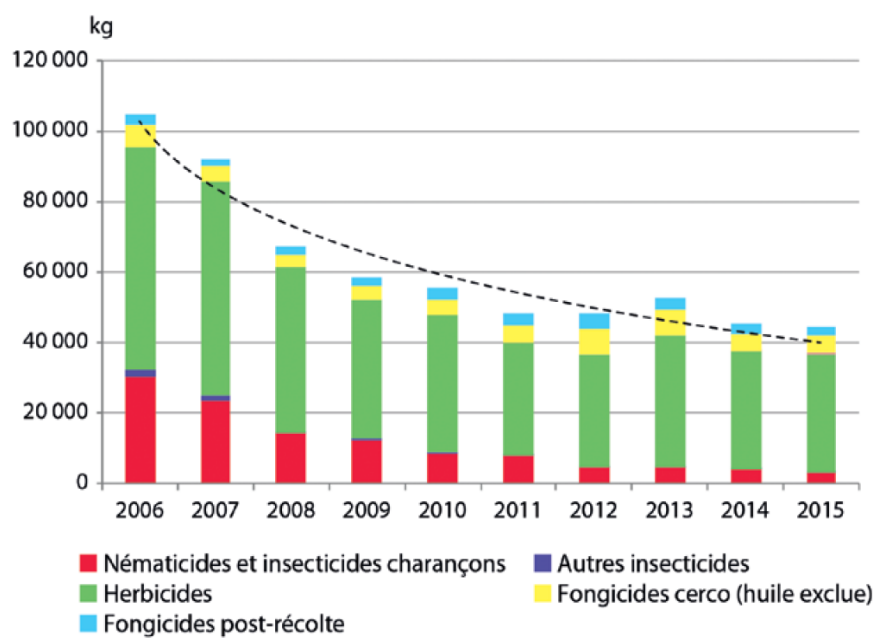


Figure 5 : Réduction de l'usage de produits phytosanitaires à la suite du déploiement des PBD (Risède et al., 2018)

les Antilles, ce projet se veut précurseur dans la construction d'une trajectoire d'innovation vers l'établissement d'un modèle de culture durable des bananiers dans les Antilles françaises.

Les PBD accompagnent l'émergence de nouveaux modes d'organisation de la filière BGM, avec notamment la création en 2008 de l'Institut Technique de la Banane -aujourd'hui Institut Technique Tropical (IT2)- et la construction de deux plateformes collaboratives d'innovations, autour de la conception de systèmes bananiers innovants et de la création et sélection variétale (Risède *et al.*, 2018). L'innovation est mise au service de l'impulsion d'une transition agro-écologique des systèmes bananiers et le pari est réussi : les pratiques culturales alternatives développées par les PBD aboutissent à une diminution de 60% de l'utilisation de produits phytosanitaires dans les systèmes bananiers (Figure 5).

c. Vers l'émergence d'une filière bananes biologiques en Martinique

Les consommateurs réclament du bio et du made in France

Alors que l'environnement institutionnel impose un cadre d'innovation pour répondre aux objectifs définis par le gouvernement -et plus largement l'Europe- en termes de réduction de l'impact environnemental de l'agriculture, le marché de la banane fait également face aux nouvelles exigences des consommateurs. En effet, la pression sociale autour de la qualité des produits consommables s'accroît et impose à la filière de nouveaux objectifs de production qui incitent à l'innovation pour améliorer sa compétitivité, sur un marché désormais soucieux de la durabilité environnementale des produits qu'il propose. Le consommateur impose donc un cahier des charges de plus en plus exigeant qui place l'Agriculture Biologique (AB) comme critère de choix. À ce titre, en 2020, l'Agence Bio enregistrait une hausse de la demande et de l'engouement suscité par les produits biologiques tropicaux, dont notamment la banane. Si la certification AB semble séduire le consommateur, l'origine est également un critère de sélection : le baromètre de l'Agence Bio indique que le consommateur français de produits biologiques privilégierait l'origine France à 93% en 2022. Ainsi, si la production bananière s'inscrit dans une transition agroécologique vertueuse, ces changements ne semblent pas faire l'objet d'une communication impactante auprès des consommateurs, voire ne suffisent pas à les séduire, quand ces derniers paraissent se reconnaître davantage dans le label AB.

Des freins à l'émergence d'une filière bananes biologiques dans les Antilles

Bien que la production de la banane en AB donne des résultats tout à fait encourageants dans des zones sèches irriguées comme en Équateur ou en République Dominicaine, qui auraient assuré en 2021 près de 80% de l'approvisionnement en bananes biologiques du marché européen (Dawson, 2022), le contexte insulaire de la Martinique dans un environnement tropical humide, pose un cadre de contraintes particulier. Par ailleurs, les exigences de qualité sont élevées pour l'export et le marché international ultra compétitif ; les coûts liés aux prestations sociales plus importants que dans les autres zones de production et le cadre strict de la réglementation européenne donne un avantage certain à la concurrence exacerbée qui régit le marché mondial. Enfin, certains freins techniques sont encore à lever pour permettre l'essor de la banane antillaise biologique. Ce manque de références techniques et économiques instaure un climat de crainte auprès des Organisations de Producteurs (OP) qui freinent le développement d'une telle filière. Aussi, si la bananeraie antillaise a signé son entrée en bio en 2019, la production reste anecdotique avec seulement 146 hectares recensés en conversion la même année (Agence Bio, 2020).

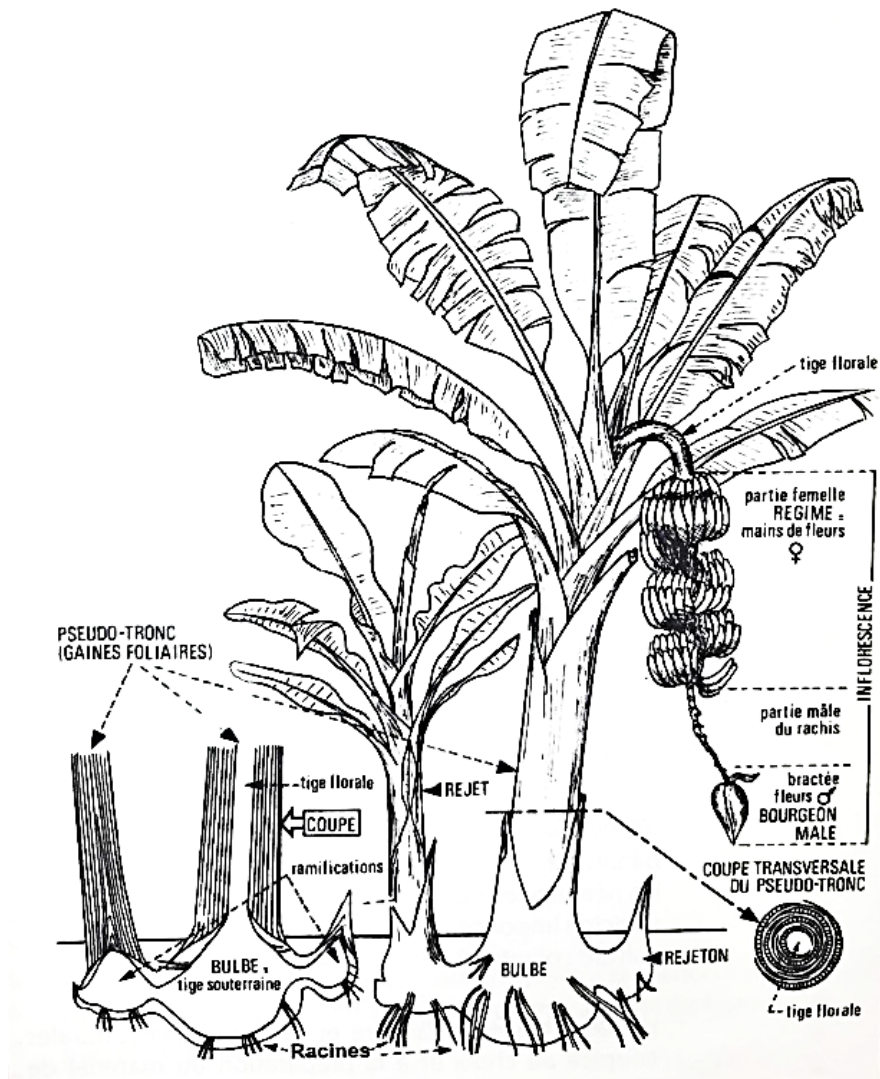


Figure 6 : Schéma d'un bananier à la fructification et de ses rejets (Champion, 1987)

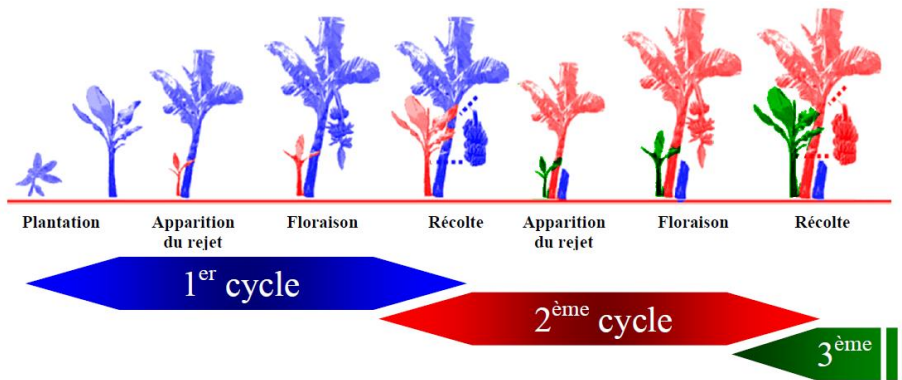


Figure 7 : Succession dans le temps des différents stades de développement du bananier (D'après Tixier et al., 2004)

d. BANABIO un projet d'évaluation de systèmes bananiers innovants en Agriculture Biologique

Ainsi, depuis plus de dix ans, les systèmes de culture de bananes desserts conventionnels ont progressivement évolué vers des systèmes écologiquement intensifs. Or, l'agriculture biologique représente le niveau le plus avancé de la transition agroécologique et les évolutions réglementaires et sociétales imposent désormais le cadre de l'AB comme une contrainte imminente dans les Antilles françaises. Dans ce sens, le projet BANABIO (Évaluation de systèmes de culture innovants de BANAne BIOlogique, 2018-2022) vise à évaluer les performances et impacts de systèmes bananiers biologiques innovants destinés à la filière export. Il ambitionne ainsi de démontrer que les verrous techniques à l'essor d'une filière AB peuvent être levés, identifiant en conséquence de nouveaux leviers en réponse à ces contraintes.

Un projet pionner

Alors que les PBD ont permis l'adoption par les planteurs d'un certain nombre de pratiques alternatives permettant la transition des agrosystèmes bananiers vers un modèle plus durable, le cadre de contraintes restait celui de la production conventionnelle. D'autre part, l'approche système du projet implique une étude multifactorielle, qui intègre à l'évaluation un ensemble de leviers techniques, dans un même système de culture.

Un projet multi-acteurs

Lancé en 2018, ce projet est porté par le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et l'IT2, et mobilise un public diversifié qui implique les institutions (Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt ; Organisme National des Forêts) et les producteurs. Cette collaboration multi-acteurs ambitionne d'assurer un transfert des connaissances scientifiques et techniques pour favoriser, à termes, l'initiative de conversion et d'installation d'agriculteurs en AB. BANABIO bénéficie des financements du Plan Écophyto II, dans le cadre des dispositifs DEPHY EXPE.

2. État de l'art

a. La culture de la banane

Biologie du bananier et conduite culturale

Le bananier est une plante tropicale herbacée monocotylédone à rhizome, originaire de l'Asie du Sud-Est (Simmonds, 1962) et qui appartient à la famille des Musacées. La banane dessert, dont le cultivar Cavendish, appartient au genre *Musa* (Ganry, 2004).

Le bananier se développe à partir d'un bulbe qui peut rester indéfiniment dans le sol et produit plusieurs rejets à l'origine de la prochaine génération de bananiers. C'est au niveau du rhizome que se différencient les rejets, caractérisés par une imbrication de gaines foliaires formant le pseudotrunc, au centre duquel « monte » l'inflorescence qui donnera le régime de bananes (Figure 6) (Champion, 1963).

Ainsi, chaque pied, issu d'un rejet latéral, produit un régime de bananes puis meurt et est remplacé par un rejet successif. Un pied de bananier ne produit ainsi qu'un seul régime au cours de sa vie. Lors de la récolte, le régime est exporté de la parcelle et le pied-mère porteur est immédiatement coupé et laissé à décomposer dans la parcelle. La production du prochain régime est alors assurée par le rejet. Chaque récolte de régime marque la fin d'un cycle de production (Figure 7), dont la durée varie de huit à dix mois en Martinique pour la variété Cavendish ; elle est notamment influencée par les conditions bioclimatiques d'altitude et de pluviométrie. À la fin

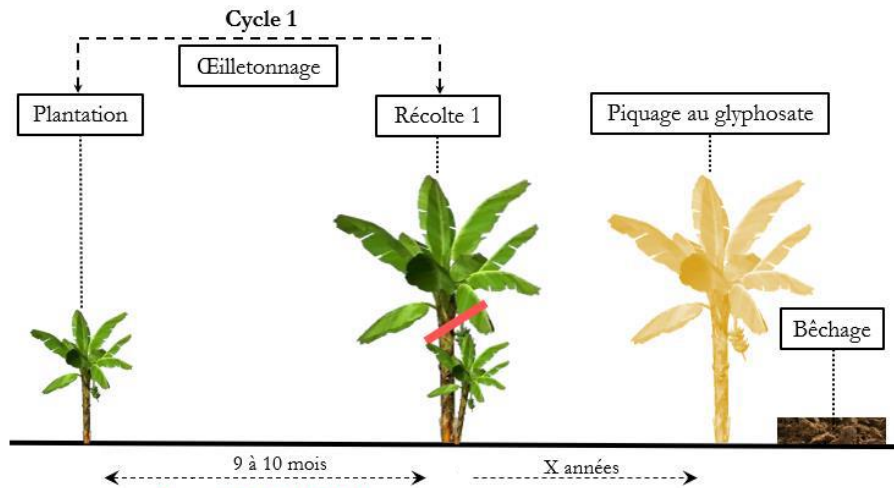


Figure 8 : Conduite de la culture de bananiers (reproduction de Joubert 2007 et Lassoudière 2007)

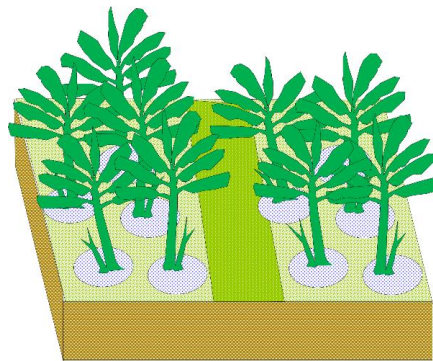


Figure 9 : Schéma d'un système bananier planté en double-rang

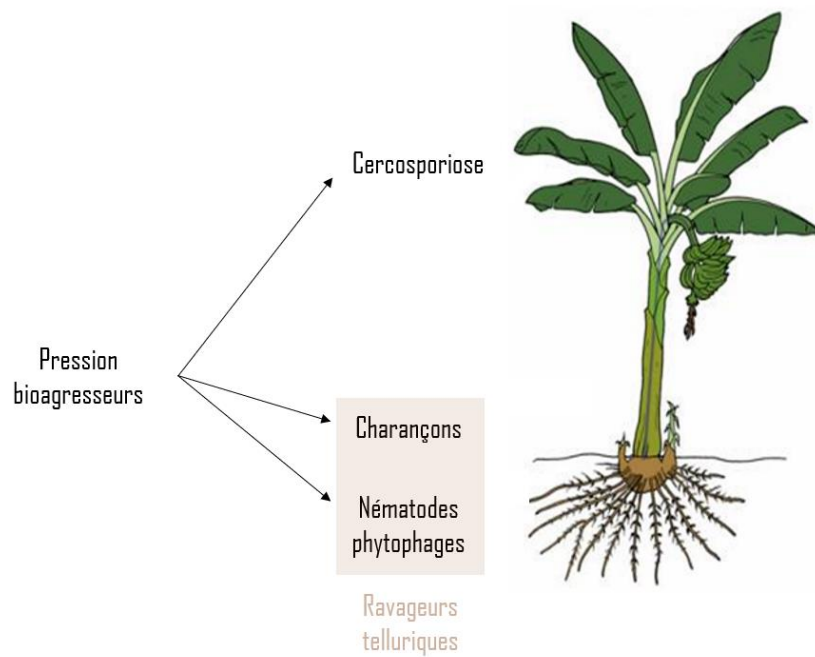


Figure 10 : Les systèmes bananiers soumis à diverses pressions bioagresseurs

de chaque cycle, afin d'assurer une bonne continuité de la production, le planteur sélectionne un rejet latéral qui fera suite au pied mère, en s'assurant que chaque bulbe ne porte que deux plants de bananiers simultanément : un bananier parent et son rejet.

Lorsque la baisse de rendement de la parcelle devient trop importante, soit généralement après six à dix ans de culture, la bananeraie est ensuite détruite par piquage du pseudotrunc au glyphosate, suivi d'une destruction mécanique des souches pour éviter le développement du charançon (Figure 8). Cette baisse de production est notamment associée à une augmentation de la pression en bioagresseurs (Lassoudière, 2007).

La culture bananière est donc dite semi-pérenne : semi car chaque plant meurt après la production d'un régime et pérenne car les bulbes de bananiers restent en production dans le sol plusieurs années avant de laisser place soit à une phase de jachère soit à une autre culture.

En Martinique, la culture de bananes desserts destinées à l'export est majoritairement conventionnelle, reposant sur un système de monoculture monovariétal de la variété Cavendish. Ce système mono-spécifique est planté majoritairement en double-rang (ligne jumelée) qui permet d'optimiser la mécanisation (Figure 9), bien que certains planteurs adoptent une plantation en simple rang (ligne simple).

Les besoins nutritifs de la bananeraie : une culture exigeante en azote et grande consommatrice en eau

Les bananiers nécessitent une grande quantité d'eau, soit entre 1500 et 3500 millimètres de précipitations par an, ainsi qu'un fort ensoleillement comptant de 1500 à 2500 heures d'insolation sur la période de culture et de production. Ils affectionnent les sols riches en MO ; les bananiers affichent un important besoin en azote et éléments nutritifs. Dans les systèmes bananiers conventionnels, la fertilisation minérale est donc basée sur des apports réguliers de fertilisants minéraux, visant à couvrir ces besoins ainsi que les exportations par le régime à la récolte. Enfin, le développement optimal du bananier nécessite un sol caractérisé par une bonne structure qui facilite la circulation de l'eau et permet un ancrage optimal des racines, facilitant les échanges nutritifs et d'eau.

Une culture confrontée à de multiples bioagresseurs

La monoculture de bananiers et son mode d'exploitation intensif, couplé à une concentration des bananeraies dans des zones très proches géographiquement a favorisé le développement de diverses pressions de bioagresseurs (Figure 10).

▪ Le charançon du bananier

Le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus* (Germar) est un ravageur spécifique majeur des bananeraies, originaire de la région indo-malaysienne (Gold *et al.*, 2001). Ce coléoptère, d'abord brun-rouge à l'émergence, est ensuite reconnaissable par sa cuticule très dure de couleur noire et son rostre allongé (Figure 11) ; il mesure neuf à quinze millimètres ; le dimorphisme sexuel porte notamment sur la différence de taille, les femelles étant en moyenne plus massives que les mâles (Cuillé, 1950 ; Gold *et al.*, 2001). Le charançon est un insecte au mode de vie nocturne, dont le rythme d'activité compte environ douze heures de repos diurne. Il résiste très bien à l'immersion (Lemaire, 1996) et au jeûne ; il se caractérise par un instinct grégaire et présente une aptitude à la feinte de mort (Delattre, 1980 ; Treverrow, 1993). Le charançon se déplace en marchant, sa progression semble lente et limitée (Delattre, 1980 ; Vinatier *et al.*, 2010). Bien que l'adulte dispose d'ailes fonctionnelles, le vol n'a quasiment jamais été observé (Sponagel *et al.*, 1995 ; Gold *et al.*, 2001).

Le charançon suit un développement dit holométabole, c'est-à-dire que son cycle évolutif implique une métamorphose complète (Figure 12). La période séparant la ponte du stade adulte varie de cinq à sept semaines. La durée de vie moyenne de l'insecte est estimée de douze à dix-huit mois dans les Antilles (Cuillé & Vilardebo, 1973) et peut excéder deux ans (Froggatt, 1925). Les mâles produisent une phéromone d'agrégation -la sordidine- qui attire les individus des deux



Figure 11 : Charançon du bananier *C. sordidus* (INPN)

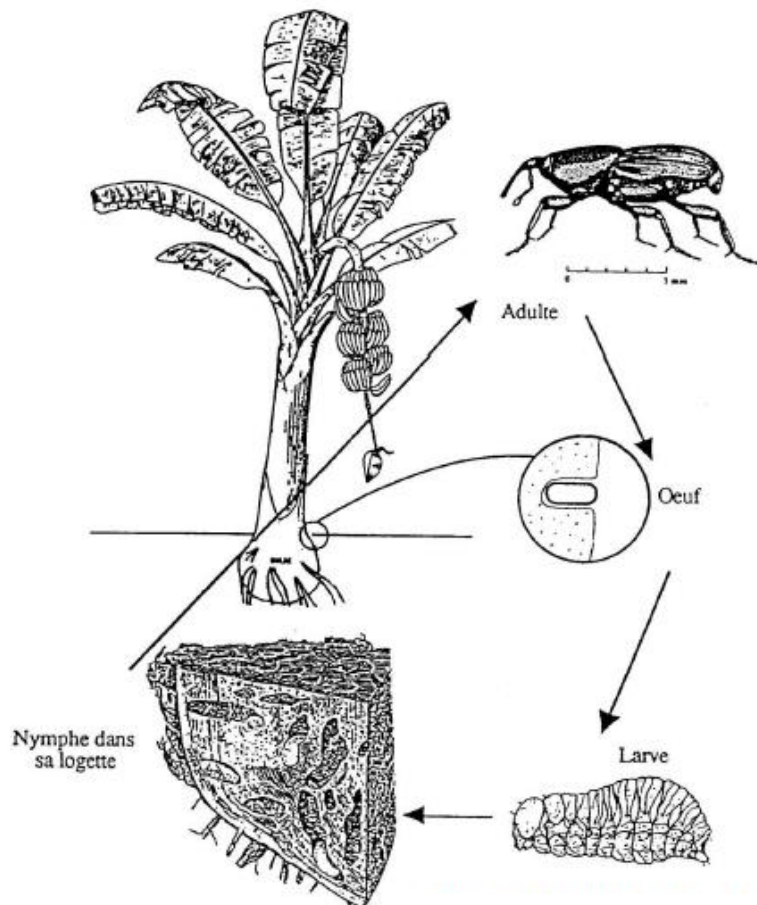


Figure 12 : Cycle de vie du charançon du bananier *C. sordidus* (McCormack, 2009)



Figure 13 : Dégâts de larves de charançons *C. sordidus* dans un bulbe de bananiers (Tresson, 2021)

sexes, permettant alors l'accouplement (Lemaire, 1996). Les femelles ont une fécondité faible de deux œufs par semaine en moyenne (Vinatier *et al.*, 2009) et déposent leurs œufs à la surface du bulbe, préférentiellement sur des bananiers qui ont atteint le stade de floraison. Les larves accomplissent alors cinq à huit stades larvaires et mesurent dix à douze millimètres en fin de croissance (Treverrow, 1985). Elles sont armées de fortes mandibules qui leur permettent d'évoluer à l'intérieur du bulbe et dans le pseudotrunc en creusant des galeries (Figure 13).

Les dégâts occasionnés par les larves affectent le transport des nutriments et de l'eau dans le bananier, retardant ainsi son développement et impactant la vigueur du plant, ce qui entraîne un nanisme des bananiers adultes et la malformation et la diminution du poids des régimes (Gold *et al.*, 2001 ; Lemaire, 1996). Par ailleurs, le plant de bananier fragilisé est également plus sensible à la verse et peut chuter par déracinement dans des conditions de vent fort. De plus, les galeries creusées par les larves sont des portes d'entrée à des agents pathogènes secondaires tels que *Ralstonia solanacearum* et *Fusarium oxysporum* (Castrillon, 1991) qui provoquent le pourrissement du corme. En détruisant le méristème apical, une seule larve peut suffire à causer la mort d'un jeune plant (Mestre et Risède, 1997). Lors de sévères attaques, les pertes de rendement peuvent aller jusqu'à 100% des bananiers (Gold *et al.*, 2001).

Le charançon adulte évolue principalement dans les résidus de culture et les environnements humides -truncs coupés ou en décomposition, bulbes abîmés, coupés ou enfouis dans le sol- (Treverrow, *et al.*, 1992 ; Vilardebo, 1960 ; Vilardebo, 1973) et se nourrit principalement de bulbe et de rhizome de bananier (Cuillé, 1950). Bien que l'essentiel des dégâts causés par le ravageur soit provoqué par l'alimentation des larves, le charançon adulte est capable de se propager entre les parcelles, pouvant alors provoquer des dégâts sur une zone étendue (Vinatier, 2010). Les dégâts s'amplifient au fil des cycles de production, selon le rythme de croissance de la population de charançons.

Le cycle de vie de l'insecte et sa biologie -coléoptère cuirassé nocturne dont la larve est localisée à l'intérieur du bulbe- rend sa régulation difficile et en fait l'un des grands enjeux de la culture de bananes dans les Antilles et dans le monde.

- **Les nématodes phytophages**

Les nématodes phytophages, sont des vers microscopiques qui vivent dans le sol et/ou dans les racines des plantes. Ce sont des parasites telluriques de la banane qui causent des dégâts considérables en s'attaquant aux racines du bananier et comptent parmi les bioagresseurs majeurs des bananiers (Gowen *et al.*, 2005). La principale espèce pathogène en bananeraies est *Radopholus similis* (Cobb) (Poeydebat 2016) (Figure 14). Cet endoparasite dit migrateur -car capable de se déplacer à chaque stade de son développement- accomplit tout son cycle de vie dans la zone corticale des racines du bananier ; il peut réaliser l'intégralité de son cycle de vie dans la même racine. La durée du cycle d'œuf à œuf varie de vingt à vingt-cinq jours suivant la température (Sarah *et al.*, 1996) ; les œufs éclosent après deux à six jours (Duncan et Moens, 2006) ; les stades juvéniles se succèdent en dix à quinze jours (Figure 15). Tous les stades sont infectieux.

R. similis se déplace dans les cellules des racines du bananier : après avoir ingéré le cytoplasme d'un groupe de cellules, il progresse dans le volume ainsi libéré pour aller s'attaquer aux cellules situées plus loin. C'est un parasite obligatoire, il ne peut donc se nourrir qu'au détriment d'une racine vivante et se retrouve alors peu dans le sol (Poeydebat 2016). Le rapport entre densité de populations dans le sol et dans les racines (exprimé en nombre de nématodes par gramme) est d'ailleurs généralement inférieur à un centième (Chabrier, 2008). Les populations de nématodes évoluent selon le rythme d'émission des racines (Quénéhervé *et al.*, 1991). Or, le bananier émet continuellement des racines jusqu'à la floraison (Beugnon et Champion, 1966) ; les abondances maximales de ces populations sont donc observées à la floraison (Hugon *et al.*, 1984).



Figure 14 : Dessin d'observation de *R. similis* : femelle (A) et mâle (B) (Chabrier, 2008, D'après Cobb, 1915)

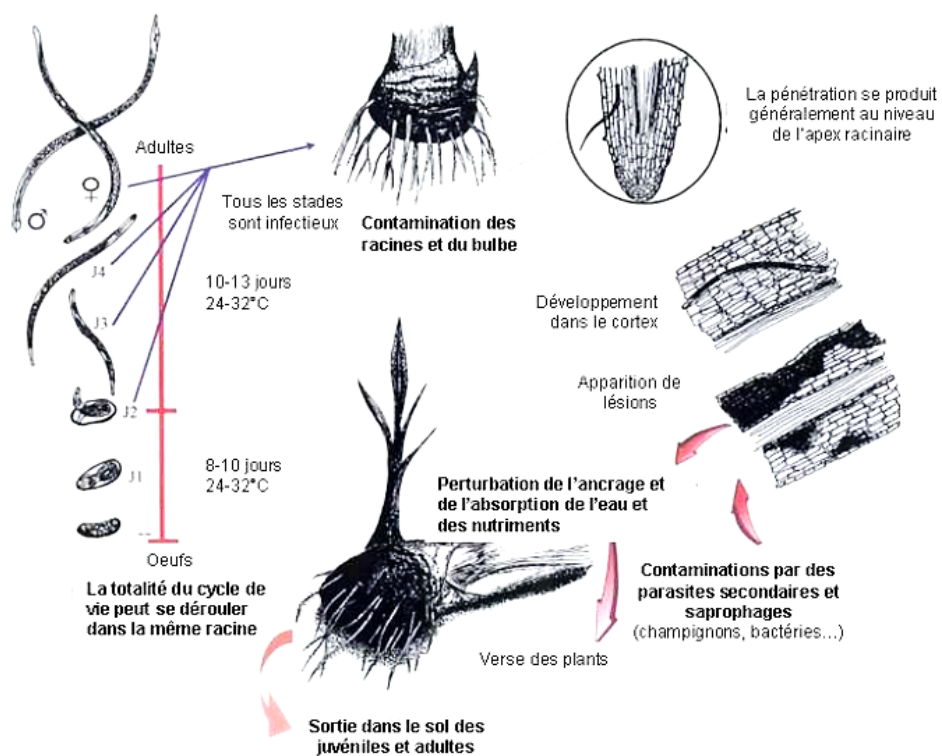


Figure 15 : Cycle de vie de *R. similis* (Chabrier, 2008, d'après Marin et al., 1998)



Figure 16 : Nécroses racinaires chez le bananier causées par les nématodes phytophages (Poeydebat, 2016)

R. similis, en se nourrissant dans le parenchyme cortical, produit des lésions du système racinaire, qui se traduisent par l'apparition de nécroses brun-rouges puis noires (Loos et Loos, 1960) (Figure 16). Ces dégâts entraînent une diminution de la capacité des racines à alimenter le bananier en eau et nutriments (Gowen, 1995) ; celui-ci produit alors des régimes plus petits. Par ailleurs, les nécroses altèrent la résistance mécanique des racines perturbant l'ancrage au sol du bananier. Or, le plant fleuri n'est supporté que par un réseau de racines peu ou pas renouvelées ; ces dernières vieillissent donc d'autant plus vite qu'elles sont fortement parasitées. Ainsi, si le parasite n'est pas maîtrisé, les pertes de rendement engendrées peuvent être très importantes, dues à des déracinements de plants notamment en période venteuse (JH O'Bannon, 1997). Les nématodes phytophages sont donc un des principaux facteurs qui régissent la durée de vie d'une bananeraie (Lassoudière, 2007).

R. similis est un parasite généraliste capable d'attaquer plus de 1200 espèces appartenant à de nombreux groupes botaniques (Duncan, 2006). En Martinique, plusieurs graminées (*Eleusine indica* (L.), *Echinochloa colona* (L.) Link), solanacées (*Solanum americanum* Mill. et *S. torvum* SW.) et surtout une urticacée (*Phenax sonneratii* (Poir.) Wedd.) constituent de bons hôtes (Quénéhervé *et al.* 2006).

La dissémination des nématodes phytophages se fait notamment par le matériel végétal, les outils agricoles, le vent et les eaux d'irrigation et de ruissellement.

- **La cercosporiose noire**

La cercosporiose noire du bananier ou maladie des raies noires est une maladie fongique causée par *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. Détectée pour la première fois en Martinique en 2010 (Direction de l'Agriculture de l'Alimentation et de la Forêt Martinique), ce champignon se propage par l'eau ou par le vent et peut se déplacer à plus d'un kilomètre de sa source (Rieux *et al.*, 2013). Cette maladie fongique provoque un dessèchement de la surface foliaire qui perturbe la photosynthèse, entraînant des pertes de rendement et accélérant le murissement du régime jusqu'à le rendre impropre à l'exportation (IT2).

b. Des pratiques culturelles alternatives reposant sur la promotion de services écosystémiques

Alors que les systèmes bananiers conduits en conventionnel reposaient principalement sur le recours massif aux intrants de synthèse -produits phytosanitaires et engrais de synthèse- les lourdes conséquences environnementales et sociétales de ces pratiques évoquées dans la première partie de l'introduction ont motivé la recherche de pratiques alternatives. Celles-ci reposent sur l'utilisation et la promotion de la biodiversité, naturelle et planifiée, pour améliorer la fonctionnalité des plantations et diminuer leurs besoins en intrants. Ce principe, largement théorisé sous la notion de Services Écosystémiques (SE) et dont un référentiel, dit EFESE-EA, a récemment été développé pour leur application en agroécosystèmes depuis 2017 (Annexe I), est la base même du principe de la transition agroécologique.

La substitution de la fertilisation minérale par la fertilisation organique

Une des stratégies alternatives à l'utilisation de fertilisants minéraux est leur substitution par des amendements organiques qui permettent d'améliorer l'activité biologique du sol en alimentant les communautés du sol (microorganismes et faune du sol), responsables de la réalisation des SE dans la plantation. Elles permettent notamment le recyclage des MO, permettant la restitution d'éléments nutritifs indispensables au développement du bananier. Il est cependant essentiel d'être attentif à la nature -engrais vert, compost, fumier, granules organiques solubles, etc.-, au choix de la composition et au mode d'apport de ces engrais pour assurer la disponibilité des ressources minérales pour le bananier (Tabarant *et al.*, 2011).

En effet, du fait que l'on ne maîtrise pas la vitesse de minéralisation des engrais organiques, ces derniers se révèlent souvent moins efficace que des engrais minéraux, qui sont eux, immédiatement disponibles pour la plante.

Des pratiques alternatives promouvant le SE de régulation des bioagresseurs telluriques du bananier

Le déploiement des PBD a permis la mise au point de pratiques alternatives de gestion des ravageurs telluriques dont certaines sont désormais adoptées par les planteurs. Cette démarche a d'ailleurs abouti à une réduction de près de 60% de l'utilisation de produits phytosanitaires dans les bananeraies (Risède *et al.*, 2018).

Depuis lors, le contrôle des ravageurs telluriques -charançons et nématodes- repose tout d'abord sur l'assainissement du sol par une phase de jachère spontanée ou composée de plantes de services, voire une rotation de cultures durant cinq à six ans avant la plantation d'une nouvelle bananeraie (Risède *et al.*, 2010, Rhino *et al.*, 2010, Duyck *et al.*, 2012, Okolle *et al.*, 2020). L'élimination de toutes les repousses de bananiers après la phase d'interculture est essentielle. En effet, puisque les charançons ainsi qu'une partie importante des nématodes phytophages se nourrissent de bananiers, l'absence de cette plante pendant plusieurs mois permet d'assainir le sol de ses populations de bioagresseurs. L'efficacité de cette pratique est, dans un second temps, renforcée par l'utilisation de vitroplants de bananiers lors de la l'implantation de la bananeraie, autrement dit par la replantation de matériel végétal sain issu de culture in vitro. Désormais, se sont plus de 80% des planteurs qui se sont appropriés ces méthodes de lutte prophylactique.

Cependant, si ces pratiques ont permis de limiter efficacement la pression en nématodes phytophages, les infestations de charançons restent problématiques notamment dans des bananeraies vieillissantes (Chabrier, 2005). En complément de ces pratiques, le contrôle des populations de charançons est ainsi complété par le déploiement d'un réseau de piégeage à phéromones massif dans les bananeraies (Gold *et al.*, 2001). Cependant, cette pratique est coûteuse et n'a qu'une efficacité modérée. Il est donc nécessaire d'explorer de nouvelles stratégies de gestion du ravageur.

L'arrêt des herbicides : un levier de réintroduction de diversification végétale dans les systèmes bananiers

La fauche du couvert herbacé constitue l'alternative la plus évidente à l'utilisation d'herbicides dans les bananeraies. Celle-ci implique alors le maintien d'un couvert enherbé permanent dans les systèmes bananiers, levier vecteur de réintroduction d'une diversification végétale dans les bananeraies. Si les fauches régulières permettent de maîtriser la biomasse du couvert herbacé, Ripoche *et al.* (2012) mettent cependant en évidence l'effet sélectif de la fauche en faveur des graminées, adventices qui rentrent en compétition avec la bananeraie dans l'accès aux ressources nutritives. Il faut également considérer le coût de la main d'œuvre qui peut être un frein à la mise en place de cette pratique.

▪ Compétition du couvert enherbé avec la bananeraie pour les éléments nutritifs

Il faut également prendre en compte le fait que la diversification végétale des systèmes bananiers par le maintien d'une couverture enherbée permanente augmente la demande en nutriments et en eau de l'agrosystème, induisant une compétition du couvert avec les bananiers pour la nutrition (Achard *et al.*, 2018, Damour 2012, Ripoche *et al.*, 2012). Cependant, la forte sur-fertilisation des bananeraies par rapport aux besoins de la culture (Dorel *et al.*, 2008) permettrait de compenser les prélèvements du couvert, du moins en partie, bien que ces aspects aient rarement été quantifiés. Par ailleurs, l'implantation de légumineuses en plantes de services peut permettre de diminuer la compétition en azote, voire d'augmenter à terme le stock d'azote organique du sol.

Il est intéressant de noter, tout de même, que la restitution de biomasse engendrée par une fauche régulière agit comme un apport de MO fraîche en surface.

- **Impacts de la diversification végétale des systèmes bananiers sur la régulation des bioagresseurs**

Alors que la lutte biologique par introduction s'est révélée inefficace (Gonzales *et al.*, 2018 ; Lopes *et al.*, 2014 ; Tinzaara *et al.*, 2007 ; Chabrier, 2008), les études récentes s'intéressent au contrôle biologique par conservation, qui consiste à favoriser voire augmenter les populations d'ennemis naturels déjà présentes dans la zone de culture et ainsi maximiser la régulation qu'elles apportent (Ehler, 1998). Il s'agit donc de se concentrer sur le contrôle fourni par les prédateurs généralistes naturellement présents dans les bananeraies.

Diverses études suggèrent la diversification végétale des systèmes bananiers comme un levier d'augmentation de la biorégulation de *C. sordidus* (Mollet *et al.*, 2012 ; Tixier *et al.*, 2013 ; Poeydebat *et al.*, 2017). Cette diversification est permise par l'arrêt ou la forte diminution de l'utilisation d'herbicides dans les bananeraies, qui entraîne la présence d'un couvert enherbé permanent -spontané ou semé- dans les inter-rangs. Poeydebat (2017) met ainsi en évidence qu'augmenter la richesse végétale dans un système bananier améliore la biorégulation du charançon en favorisant un réseau alimentaire multi-trophique. En effet, les débris végétaux sont la base alimentaire de la voie détritvire du réseau trophique des arthropodes du sol. Ils représentent donc une source de nourriture et de refuges pour les arthropodes lucifuges et détritvires qui servent ensuite de proies aux ennemis naturels du charançon. Par la suite, Mollot *et al.* (2012) démontrent que la prédation des œufs est plus élevée dans des bananeraies avec couverture végétale (la poacée *Brachiaria decumbens*) que sur sol nu. Par ailleurs, Poeydebat (2016) met en évidence le fait que les bioagresseurs spécialistes -comme le charançon- sont sensibles à l'abondance de leur hôte, le bananier, et donc aux effets de dilution, c'est-à-dire que dans une parcelle cultivée la présence de plantes non hôtes du charançon réduit sa capacité à localiser et infester les plantes hôtes. Accroître la biodiversité fonctionnelle dans les systèmes bananiers par le maintien d'une couverture végétale permet donc de favoriser cet effet de dilution.

Cependant, diverses études (Mollot *et al.*, 2014 ; Carval *et al.*, 2016) mettent l'accent sur l'importance d'une diversification végétale plus complexe qu'une simple couverture végétale monospécifique dans la biorégulation du charançon. Ces observations sont confirmées par Poeydebat (2016) qui met en évidence l'importance de la communauté de plantes de la strate herbacée dans la biorégulation du charançon. Elle démontre alors que la richesse spécifique de cette communauté importe davantage que sa biomasse. En effet, augmenter la biodiversité fonctionnelle dans les systèmes bananiers permet d'accroître les formes d'habitat et de ressources alimentaires favorisant ainsi une plus grande diversité de proies alternatives et donc de prédateurs du charançon.

Néanmoins, Poeydebat (2016) souligne l'effet positif de l'addition de plantes autre que *Musa* dans les bananeraies sur l'abondance du nématode phytophage *R. similis*. En effet, ce bioagresseur généraliste est capable de parasiter de nombreuses familles de plantes (Castagneyrol *et al.* 2012 ; Jactel and Brockerhoff 2007 ; Quénéhervé *et al.* 2006). Ainsi, augmenter la richesse spécifique la strate herbacée augmente les probabilités de fournir des hôtes alternatifs à *R. similis*.

- **Impacts de la diversification végétale des systèmes bananiers sur le maintien de la structure du sol**

Par ailleurs, le maintien d'un couvert enherbé permanent dans les bananeraies permet de protéger la surface du sol de l'action mécanique du vent et de l'eau (Wischmeier, 1958 ; Wischmeier et Smith, 1978). La couverture végétale fournit également une ressource trophique supplémentaire aux organismes du sol, qui permettent d'accroître la porosité du sol et sa perméabilité en créant des galeries (Lavelle *et al.* 1997 ; Bertrand *et al.*, 2015). Le réseau racinaire des plantes de couverture assure, en outre, une bonne structuration et aération du sol. La présence d'un couvert végétal permet donc le maintien d'une structure du sol favorable à l'enracinement du bananier à la plantation, puis au développement de son système racinaire (Carof *et al.* 2007 ; Dorel *et al.*, 2010).

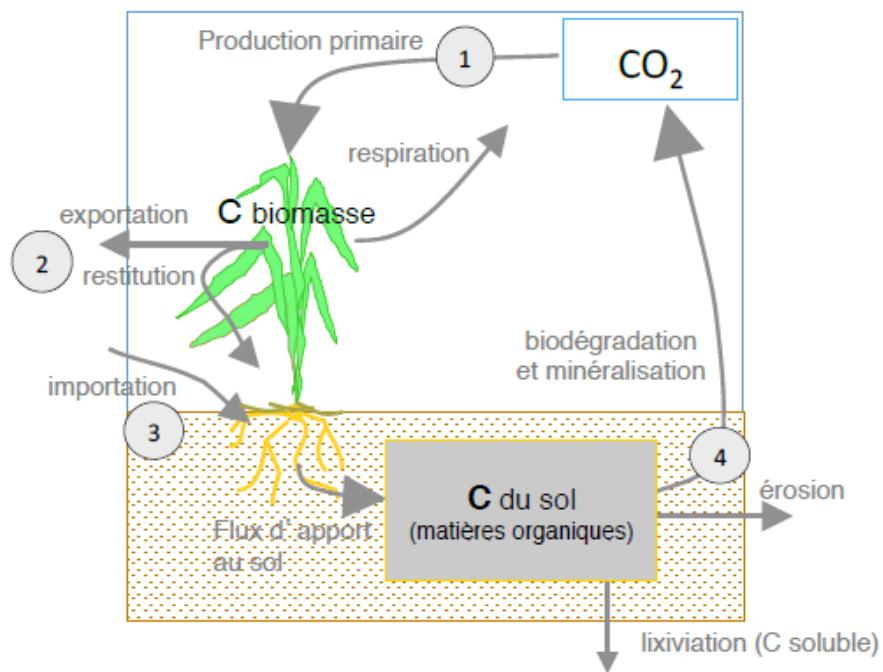


Figure 17 : Cycle du carbone dans le sol et leviers d'action pour améliorer la teneur en carbone : 1 - augmentation de la production primaire ; 2 - diminution des exportations et augmentation des restitutions ; 3 - importation de matières organiques exogènes ; 4 - diminution des pertes par minéralisation (Chenu et al., 2014)

- **Impacts de la diversification végétale des systèmes bananiers sur le stockage de carbone**

Enfin, la présence d'un couvert enherbé géré par fauches régulières permet des niveaux de restitutions accrus de résidus végétaux susceptibles de favoriser le stockage de carbone. En effet, le réservoir de carbone des sols est contenu sous forme de composés organiques, dite MO, qui provient essentiellement des résidus végétaux, déjections animales, exsudats racinaires, etc. La MO qui pénètre dans le sol est donc principalement produite par les plantes ; elle est ensuite biotransformée dans le sol et par le biais de biodégradations assurées par la communauté du sol, se minéralise pour restituer du carbone à l'atmosphère sous forme de CO₂ (Chenu *et al.*, 2014 ; Basile-Doelsh *et al.*, 2015) (Figure 17).

Ainsi, outre l'importance des apports de MO exogènes via la fertilisation ou l'amendement (Peltre *et al.*, 2012) et la restitution au sol des résidus de cultures (Arrouays *et al.*, 2002) qui impactent directement la teneur en MO du sol et permettent des stockages additionnels de carbone significatifs, Chenu *et al.* (2014) mettent également en évidence l'impact significatif du maintien d'une couverture végétale dans les agrosystèmes. En effet, cela participe à accroître les apports de MO au sol par augmentation de la production primaire et donc des restitutions au sol par fauchage régulier du couvert. Ces restitutions jouent un rôle majeur dans la dynamique des MO des agroécosystèmes et peuvent promouvoir l'augmentation des teneurs en MO du sol via le stockage de carbone dans le sol (Chenu *et al.*, 2019)

De plus, augmenter le stockage de carbone dans le sol -et donc augmenter la MO des sols- permet d'améliorer la fertilité des sols ; augmenter la rétention d'eau par le sol et améliorer sa structure et sa résistance à l'érosion ; la MO est également une ressource trophique pour la communauté du sol, son augmentation favoriserait donc la biodiversité qu'il héberge. Le stockage de carbone dans les sols est donc reconnu à la fois comme un indicateur de la santé des sols et de la durabilité des systèmes agricoles (Rutgers *et al.*, 2012 ; Lal, 2015).

Ainsi, bien que la gestion de l'enherbement par fauches régulières, et donc le maintien d'une couverture végétale permanente dans les bananeraies, soit devenue une pratique majoritaire dans les systèmes bananiers antillais, ses impacts sur la provision des SE de régulation des bioagresseurs et de maintien de la fertilité du sol -structure et stockage de carbone- sont supposés mais ont été encore relativement peu étudiés. En parallèle, une piste bénéficiant d'un regain d'intérêt majeur, mais encore très peu appliquée aux bananeraies, est l'introduction d'une strate arborée dans les plantations.

Vers le développement de l'agroforesterie pour améliorer la fourniture de SE dans les systèmes bananiers

L'agroforesterie simultanée -système agricole où les arbres et la culture cohabitent sur la même parcelle pendant la saison culturale- est définie comme « un système de gestion des ressources naturelles dynamique et écologique qui, par l'intégration d'arbres dans les exploitations et le paysage agricoles, diversifie et maintient la production pour des avantages sociaux, économiques et environnementaux accrus pour les utilisateurs des terres à tous les niveaux » (Mead, 2004).

Si l'impact de l'introduction d'arbres dans les agrosystèmes sur les bioagresseurs a été étudié pour des cultures plus classiquement cultivées en agroforesterie comme le café ou le cacao (Tschanstke *et al.*, 2011), les effets sur les bioagresseurs du bananier n'ont été que très peu étudiés et paraissent mitigés (Poeydebat, 2016)

Par ailleurs, l'agroforesterie pourrait favoriser le maintien de la structure du sol, comme cela a pu être observé par Muchane *et al.* (2020). Ils démontrent ainsi que l'agroforesterie permet d'augmenter le taux d'infiltration de l'eau dans le sol de 75% et de maintenir une plus grande stabilité de la structure du sol.

Enfin, l'agroforesterie joue également un rôle positif dans le stockage de carbone. En effet, l'implantation de ligneux en association de culture permet un stockage de carbone d'une part

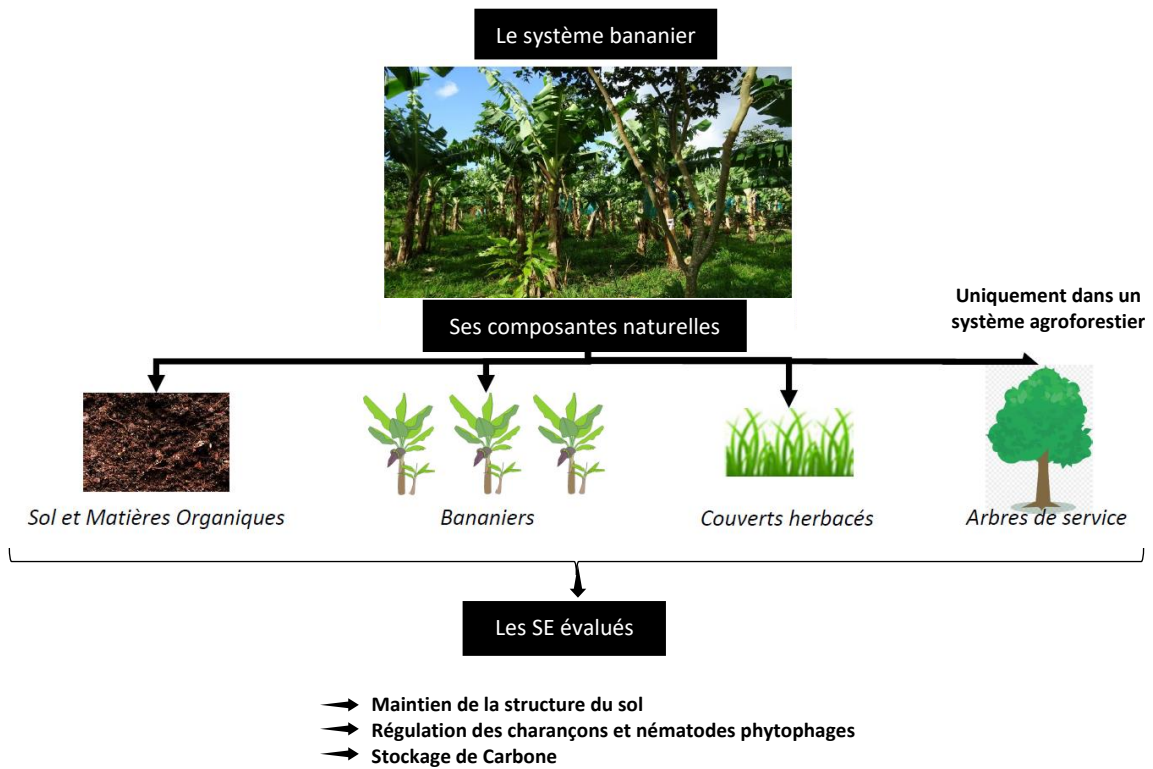


Figure 18 : Composantes naturelles du système bananiers à l'origine de la fourniture de SE (d'après Sauvadet, communication personnelle)

dans la biomasse ligneuse, et d'autre part via l'augmentation de la production primaire et en conséquence des restitutions au sol (Cardinael *et al.*, 2015) : résidus de taille, feuilles, racines mortes, etc. Muchane *et al.* (2020) ont effectivement démontré qu'un système agroforestier permet d'améliorer de 21% la capacité de stockage de carbone organique dans le sol par rapport à une monoculture. Pour cause, la diversification végétale des agrosystèmes permettant d'améliorer la structure du sol, elle augmente en conséquence les niveaux d'agrégation du sol. En effet, chaque organisme du vivant agit à son niveau sur la structuration du sol par la formation d'agrégat, les vers de terre mélangent par exemple la MO aux particules minérales du sol lors de leur ingestion (Bossuyt *et al.*, 2005). Or, le carbone du sol est protégé à l'intérieur des agrégats du sol (Six *et al.*, 2002 ; Fonte *et al.*, 2010). L'augmentation de l'agrégation du sol favorise donc le stockage de carbone par la diminution de l'accessibilité des MO à la dégradation (Bossuyt *et al.*, 2004 ; Coq *et al.*, 2007). Muchane *et al.* (2020), a démontré à ce propos que la présence d'arbres permet d'augmenter les macro-agrégats du sol de 22%.

c. L'intérêt d'une évaluation multifactorielle basée sur l'étude de la fourniture de SE

Les évolutions des pratiques culturales déployées dans les bananeraies antillaises illustrent, depuis ces dernières décennies, un exemple fort de transition agroécologique (Risède *et al.*, 2018). Cependant, si les effets directs de la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires sont connus et suivis, les conséquences de la diversification végétale des systèmes bananiers - engendrée notamment par l'arrêt de l'utilisation des herbicides- sur le fonctionnement global des agrosystèmes restent encore peu étudiées. En effet, la majorité des études s'intéressent aux impacts de la transition agroécologique des agrosystèmes en se focalisant sur l'évaluation de la fourniture d'un seul service écosystémique ou deux (Rapidel *et al.*, 2015) ; très peu d'études entreprennent d'évaluations multi-services. Or, les SE sont fortement interconnectés. Une évaluation intégrative du changement de fonctionnement des systèmes innovants doit donc passer par une étude croisée de ces services (Tibi et Therond, 2017 ; Cord *et al.*, 2017) et apparaît indispensable pour aboutir à la conception de systèmes de culture innovants reposants sur la fourniture de SE.

Dans ce contexte, sur la base de l'EFESE-EA (Annexe I), notre étude menée dans le cadre du projet BANABIO vise à dresser une évaluation multi-services de systèmes bananiers biologiques innovants traduisant un gradient de complexification de la diversification végétale. Elle s'intéresse ainsi aux bénéfices (ou inconvénients dans le cas de disservices) fournis par la biodiversité présente dans ces systèmes, dits services (ou disservices) écosystémiques. Se distinguent alors la biodiversité planifiée, c'est-à-dire introduite intentionnellement (plantes cultivées et plantes ou arbres de service) ; de la biodiversité associée, qui comprend notamment la flore adventice et la macro et mésofaune endogée et aérienne, dont les ravageurs des cultures.

Dans un agrosystème bananier cette biodiversité est incarnée par différentes composantes « naturelles » : le sol, le couvert herbacé spontané, les bananiers et les arbres de services dans le cas d'un système agroforestier. Cette biodiversité induit la fourniture de divers SE, dont la plupart impactent le rendement de la bananeraie. Parmi ces SE, cette étude s'intéresse (i) au maintien de la structure du sol ; (ii) à la régulation des bioagresseurs telluriques ; (iii) et au stockage de carbone dans le sol (Figure 18).

3. Objectifs et hypothèses de l'étude

Dans ce contexte, cette étude vise à dresser une évaluation multifactorielle de la fourniture de SE dans des systèmes bananiers innovants conduits en AB. Les SE sont ainsi mobilisés comme des outils d'évaluation de la durabilité des systèmes bananiers.

Pour ce faire, une série d'indicateurs reflétant les SE étudiés (maintien de la structure du sol ; stockage de carbone dans le sol ; régulation des bioagresseurs telluriques) sont mesurés au champ et/ou calculés. Il s'agit alors de dresser une analyse des systèmes bananiers innovants selon une approche intégrative multi-services qui permettra, d'une part, de consolider les connaissances scientifiques et d'en générer de nouvelles sur le fonctionnement de la plante et son interaction avec le milieu dans ce contexte expérimental ; d'autre part de tester l'application de leviers agroécologiques développés dans le cadre d'itinéraires conventionnels, dans un cadre de contraintes défini par le cahier des charges de l'AB. Enfin, cette démarche aboutira à la préconisation de systèmes de culture qui favorisent la fourniture de SE.

Cette étude s'inscrit ainsi dans la problématique suivante :

Dans quelles mesures la conduite d'une bananeraie en AB et en agroforesterie biologique affecte-t-elle la fourniture de SE ?

Celle-ci se décline en deux questions de recherche :

Q1 : En quoi la conversion des systèmes bananiers à l'AB impacte la provision de SE ?

H1 : La conversion des systèmes bananiers à l'AB permet d'améliorer la structure du sol et le stockage de carbone dans le sol.

H2 : La conversion des systèmes bananiers à l'AB favorise la biorégulation des charançons mais accentue la prolifération des nématodes phytophages.

Q2 : En quoi l'introduction d'arbres dans les systèmes bananiers biologiques impacte la fourniture de SE ?

H3 : L'introduction d'arbres dans les systèmes bananiers biologiques améliore la structure du sol et le stockage de carbone dans le sol.

H4 : L'introduction d'arbres dans les systèmes bananiers biologiques n'impacte pas la régulation des charançons, ni celle des nématodes phytophages.

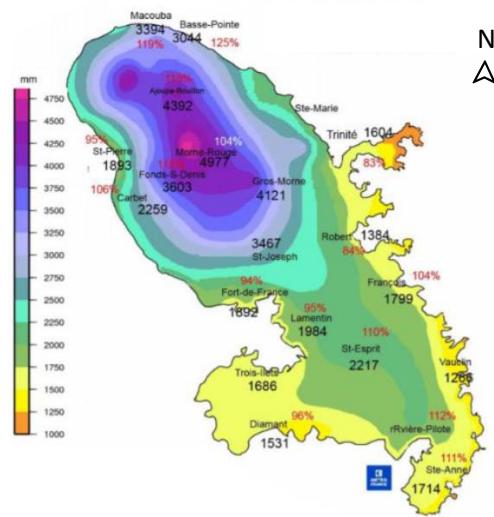


Figure 19 : Pluviométrie en Martinique (Météo France, 2018)

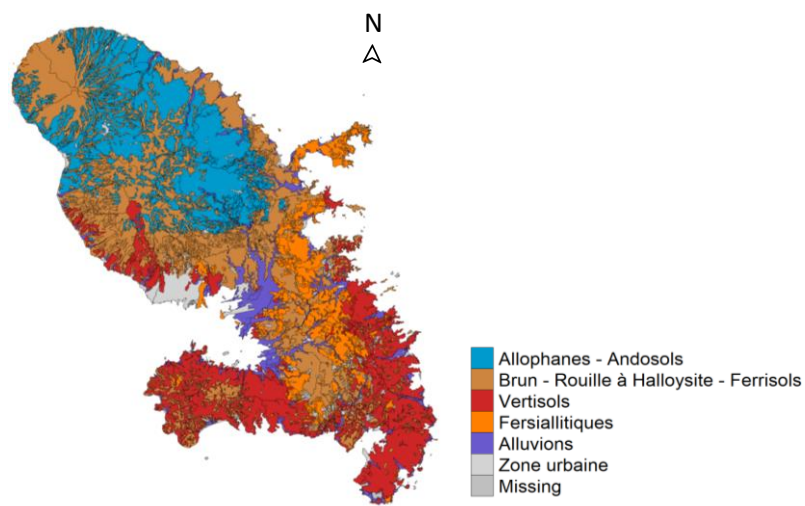


Figure 20 : Types de sol en Martinique (cartographie Qgis, réalisation A. Delaplace, d'après carte IRD)

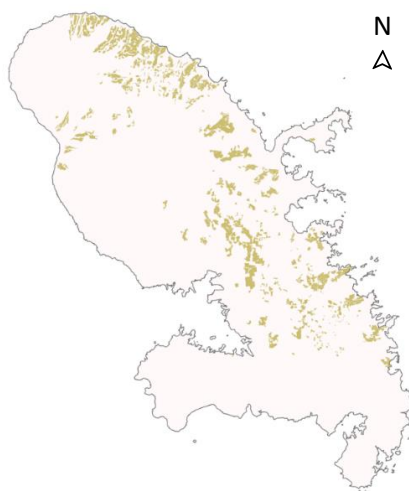


Figure 21 : Répartition de la SAU des bananeraies en Martinique (cartographie Qgis, réalisation A. Delaplace, d'après Banamart, 2019)

II - MATÉRIEL & MÉTHODES

1. Contexte pédoclimatique

a. La Martinique : terre tropicale des Caraïbes

La Martinique (14°40" N, 61°00" W), département français d'outre-mer, est située au milieu de l'archipel des Petites Antilles et bordée par la mer des caraïbes à l'ouest et l'océan Atlantique à l'est. Cette île de 1 128 km² de superficie, s'étend sur soixante kilomètres de long et trente kilomètres de large. Elle compte près de 354 800 habitants d'après le recensement de 2018 (INSEE, 2021).

La Martinique bénéficie d'un climat tropical maritime : une saison humide pluvieuse marquée par de fortes précipitations et des vents violents suivant le régime des Alizés (soufflant du nord-est) avec des risques de cyclones qui s'étalent de juin à décembre ; alterne avec une saison sèche plus ensoleillée -aussi appelée carême- de janvier à mai. La température moyenne annuelle est de 26°C et le taux d'hygrométrie moyen varie entre 80% et 90% (ODE, 2016). La répartition géographique des précipitations sur l'île est relativement inégale, fortement dépendante des reliefs et des influences maritimes. En effet, la façade Atlantique et la région nord, caractérisée par des hauts massifs volcaniques et dominée par la montagne Pelée qui culmine à 1397 mètres (Bougerard, 2016), sont très humides. La région sud et le littoral caraïbe, caractérisés par une alternance de plaines et de collines qui culminent à 500 mètres pour la haute (montagne du Vauclin) traduit un climat plutôt aride. Le centre de l'île est marqué par un relief davantage plat, composé de plaines peu étendues et fragmentées. Ainsi, selon la topographie et la pluviométrie, quatre bioclimats différents se distinguent (ODE, 2016) : un climat sec au sud, moyennement humide sur les côtes du nord, humide au nord en moyenne altitude, et très humide au nord en haute altitude (Figure 19).

Un climat marqué par des sécheresses et des aléas climatiques extrêmes

Par ailleurs, la saison sèche, ou carême, cause parfois des manques d'eau qui limitent l'approvisionnement pour l'irrigation des bananeraies. Par ailleurs, le contexte insulaire ultramarin de la Martinique est sujet à des épisodes climatiques extrêmes, accentués par le réchauffement climatique. Or, la production de bananes dépend fortement des aléas climatiques et des catastrophes naturelles. En 2007, le passage de l'ouragan Dean entraîne pour la Martinique une perte de production de 80 000 à 100 000 tonnes, soit de l'ordre de 50%. Le climat tropical humide de l'île est également un terrain de jeu propice à l'établissement de certains bioagresseurs.

Caractéristiques pédologiques de l'île

La Martinique compte une grande diversité de sols : des andosols peu évolués à Allophanes dans le Nord ; des sols bruns rouille à halloysite sur la côte nord atlantique ; dans le Centre les sols sont majoritairement fersiallitiques compacts et alluvionnaires et enfin le Sud compte généralement des vertisols à smectite (Figure 20). Ces conditions pédologiques sont favorables à la culture du bananier, excepté les vertisols du Sud de l'île (Lassoudière, 2007).

Répartition des bananeraies sur l'île

Au vu du contexte pédoclimatique et du relief accidenté de l'île, les bananeraies se concentrent donc au niveau de la côte nord Atlantique ainsi qu'au centre de l'île, zones caractérisées par des pentes plutôt faibles et une pluviométrie élevée. Plus récemment, elles s'étendent désormais jusqu'au Sud où le climat est plus sec (Figure 21) pour échapper en partie à la pression en



Figure 22 : Localisation du dispositif BANABIO en Martinique

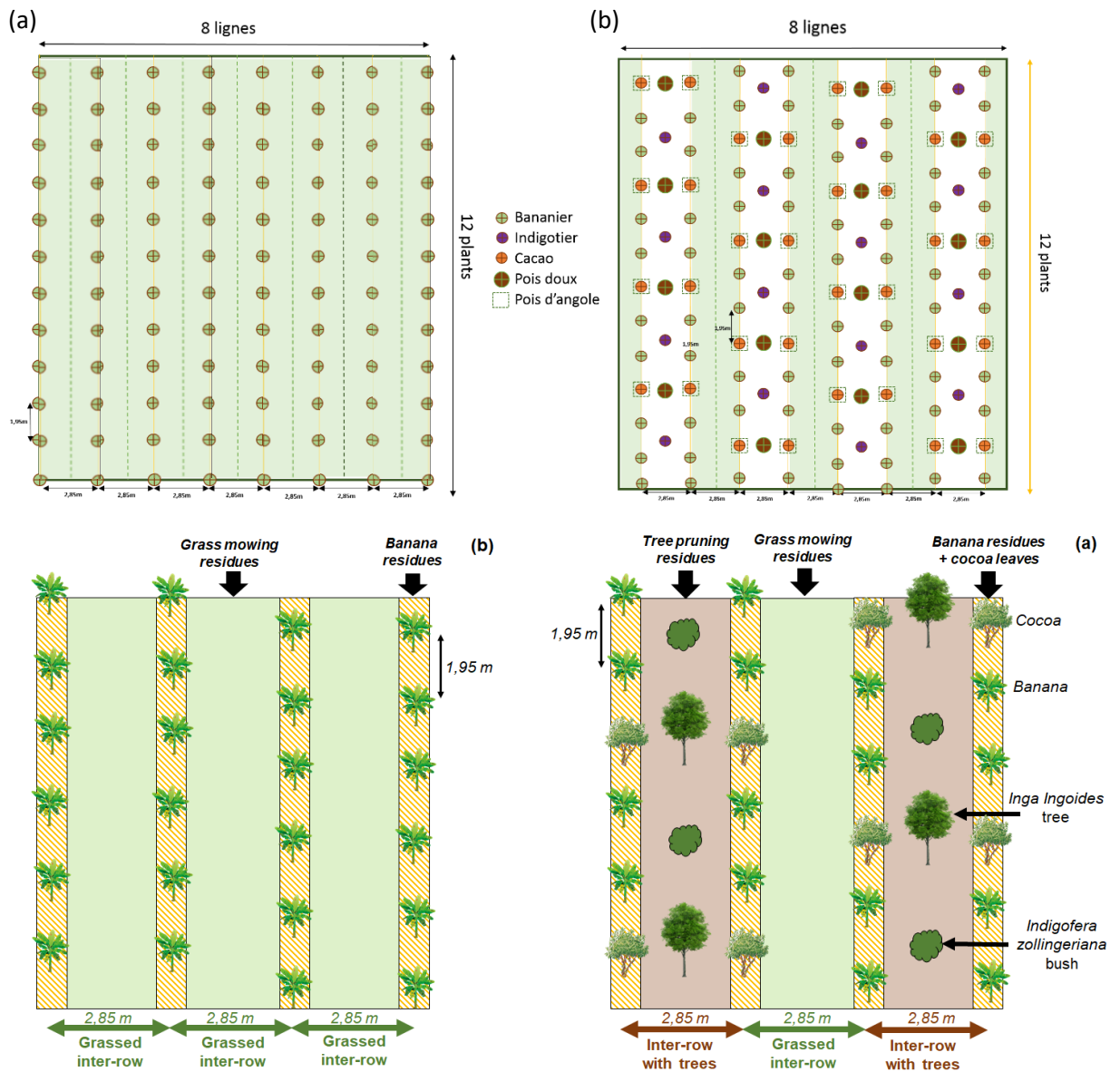


Figure 23 : (a) Plan de plantation des systèmes CO et BI (b) et du système BD

bioagresseurs. Ces zones nécessitent cependant d'être irriguées. En 2019, la SAU de culture bananière était de 5000 ha (Agreste).

b. Le site expérimental

Le site expérimental est basé sur la station de recherche du CIRAD de Rivière Lézarde (14.66° N, 60.00° W, 46 m asl), au centre de la Martinique (Figure 22). Caractérisée par un sol classé parmi les Nitisols (classification WRB), cette région de l'île évolue sous un climat tropical humide avec une température moyenne de 26.4 ± 0.1 °C et un cumul de précipitation de 2413 ± 252 millimètres (données moyennes sur la période 1997-2007, Annexe II). La saisonnalité est faible, le mois de février étant le plus sec avec un cumul de précipitations de 95 millimètres, tandis qu'octobre est le mois le plus pluvieux avec un cumul de précipitations de 313 millimètres.

2. Présentation du dispositif expérimental

Implanté en 2018 sur une ancienne monoculture d'ananas d'environ vingt-cinq ans, le dispositif BANABIO est conçu de manière à observer un gradient d'évolution de culture de bananes desserts depuis un système raisonné conventionnel vers des systèmes biologiques intensifs et diversifiés. Il met donc à l'étude trois systèmes de culture de bananes Cavendish Graine Naine qui, avec ses quelques 9800 ha (dont 3200 en jachère) cultivés, est la première variété de bananes desserts plantée dans les Antilles et commercialisée.

a. Le système COventionnel (système CO) : le système de référence producteur

Le premier système est une référence producteurs gérée en COventionnel (système CO) conçue sur la base des pratiques et Indices de Fréquence de Traitements (IFT) moyens des planteurs conventionnels de l'île (enquêtes de pratiques, DAAF et réseau DEPHY FERME).

Les deux autres systèmes étudiés répondent au cahier des charges de l'AB (Règlement (CE) N° 834/2007), n'utilisant aucun produit phytosanitaire chimique (IFT de synthèse = 0) ni engrais minéral. Ils combinent différents leviers agroécologiques qui font recours aux stratégies dite d'optimisation, de substitution et de reconception (Estevez, 2000),

b. Le système Biologique Intensif (système BI) : une conception basée sur les stratégies d'optimisation et de substitution

Le premier système dit biologique intensif se veut être le pendant du conventionnel mais en AB, autrement dit il s'agit d'une monoculture de bananes dont la conception fait donc appel aux stratégies (i) d'optimisation avec l'ajustement temporel des traitements pour optimiser les applications et la mise en œuvre d'une prophylaxie pour limiter la propagation des bioagresseurs ; (ii) de substitution des traitements chimiques par des intrants autorisés en AB (utilisation de fertilisants organiques), quand les herbicides sont remplacés par une gestion mécanique de l'enherbement. Il s'agit de mettre à l'étude un système biologique écologiquement très intensifié et peu complexe, afin de consolider l'affranchissement progressif vis-à-vis des pesticides de synthèse.

Dans le système BI, tout comme dans le système CO, la densité de plantation sur le rang est de 1800 plants de bananiers par hectare (Figure 23).



Figure 24 : Plan du dispositif BANABIO

Tableau 1 : Conduite culturale des trois systèmes étudiés

	Système conventionnel CO	Système biologique intensif BI	Système biologique agroforestier BD
Densité de plantation	1800 bananiers/ha	1800 bananiers/ha	1800 plants/ha : 1200 bananiers + 600 cacaoyers
Précédent cultural	Jachère spontanée	Jachère semée (légumineuses)	Jachère semée (légumineuses)
Gestion des charançons	Réseau de piégeage	Réseau de piégeage	Réseau de piégeage
Gestion de l'enherbement	Chimique 1 destruction/cycle	Mécanique 6 destructions/cycle	Mécanique + arbres de services 6 destructions/cycle
Mode de fertilisation	Minérale	Organique	Organique

c. Le système Biologique Diversifié (système BD) : (re)conception d'un système biologique en rupture

Le second système biologique dit diversifié est un système agroforestier qui se veut en rupture avec les modes de production actuels. Il a été imaginé autour d'un atelier de conception participative en 2018, mobilisant divers acteurs des filières biologiques et bananes : agriculteurs, techniciens, responsables d'OP, institutionnels et chercheurs.

Ainsi, en complément de la stratégie d'optimisation et de substitution déjà appliquées dans le système BI, le système BD intègre des arbres de services légumineuses, ainsi qu'une culture complémentaire à la banane. Le choix des espèces de diversification s'est porté sur des espèces locales, sélectionnées selon les services recherchés. Il s'agissait donc d'implanter dans l'inter-rang des espèces légumineuses afin de (i) fixer l'azote et restituer la MO fraîche par taille. Ces espèces doivent également être (ii) tolérantes à la taille car il est indispensable de maintenir une canopée ouverte pour ne pas gêner le développement des bananiers. Enfin, elles doivent (iii) combiner l'occupation de deux strates. Le choix s'est donc porté sur le pois doux *Inga ingoides*, une légumineuse à croissance rapide destinée à occuper la strate haute ; et sur l'indigotier *Indigofera zollingifera*, une légumineuse à port arbustif -sculpté par une taille adapté-, qui occupe la strate basse sous les bananiers. D'autre part, une fonction de diversification de la production à haute valeur ajoutée est assurée par l'implantation de cacaoyers *Theobroma cacao*, précédés de pois d'Angole *Cajanus cajan* (L.) Millspaugh. En effet, à la plantation, un bananier sur trois a été substitué par un pois d'Angole, installés en début de cycle de production de la bananeraie pour permettre la fourniture d'un mulch avant la plantation des cacaoyers et détruit six mois plus tard pour laisser place au cacaoyer. De plus, cela a permis de laisser le temps aux bananiers de se développer et de fournir une semi-ombre aux cacaoyers, qui nécessitent une exposition indirecte au soleil pour un développement optimal. Les arbres au niveau de l'inter-rang sont taillés deux fois par an afin de s'assurer qu'ils n'entravent pas la circulation dans les parcelles et ne gênent pas l'entrée de la lumière, indispensable à la croissance des bananiers.

Ainsi, dans le système agroforestier BD, la densité de plantation sur le rang est donc de 1200 plants de bananiers par hectare et 600 plants de cacaoyers par hectare. Par ailleurs, les indigotiers et pois doux, ont été implantés en alternance, un inter-rang sur deux, selon une densité de plantation de 360 arbres par hectare pour chaque espèce.

d. Dimensionnement du dispositif expérimental

Chaque système comporte trois répétitions parcelles de 500 m² environ -chacune représentant une parcelle élémentaire- disposées aléatoirement selon un dispositif en parcelles randomisées (Figure 24). L'ensemble de l'essai couvre une surface de 4500 m² cultivés. Chaque système est implanté en mono-rangs espacés de 2,85 mètres. Sur le rang, chaque plant de bananier (et/ou de cacaoyers) est espacé de 1,95 mètres. Les bananiers sont irrigués en simultanée par aspersion sous frondaison, à raison de deux à trois sessions d'irrigation par semaine.

3. Conduite culturale des systèmes étudiés

a. Stratégie de protection des cultures bananières

Gestion des ravageurs telluriques : assainissement du sol par une phase de jachère et utilisation de vitroplants

En accord avec les pratiques largement répandues depuis ces dernières années, les trois systèmes ont été implantés après une jachère assainissante. Ainsi, une jachère spontanée lors de laquelle la végétation a été laissée en libre évolution, a précédé l'implantation du système CO. Les systèmes BI et BD ont fait suite à une jachère semée plurispécifique, composée de deux plantes de service légumineuses : *Crotalaria juncea* et *Pueraria phaseoloides* (Tableau 1). La jachère a été détruite par un passage de gyrobroyeur. Les trois systèmes ont ensuite été plantés à partir de vitroplants.

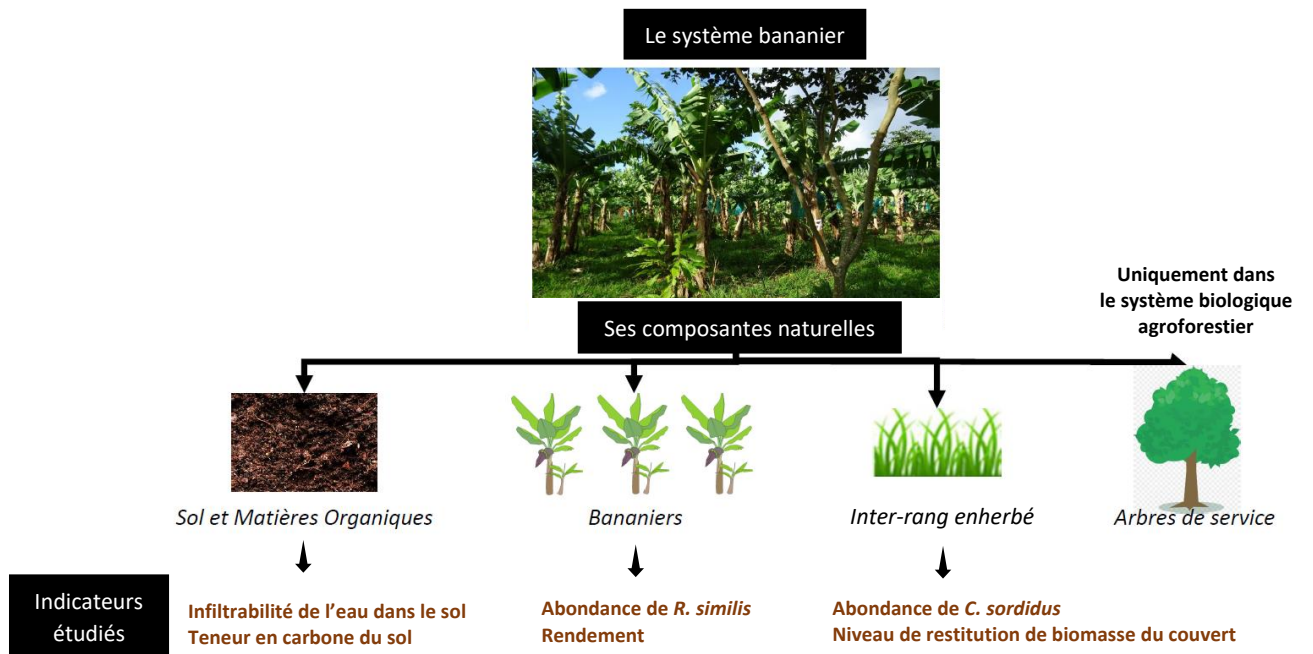


Figure 25 : Détail des indicateurs étudiés par composante naturelle du système bananier

Mise en place d'un réseau de piégeages pour lutter contre le charançon

Par la suite, une stratégie de piégeage par phéromone a été mise en œuvre de manière homogène sur l'ensemble des parcelles du dispositif pour gérer le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus*. Les pièges utilisés sont des pièges de type « pitfall », distribués sous le nom de Cosmotrack®, dont la phéromone d'agrégation utilisée est la sordidine, vendue sous le nom de Cosmolure®. Celle-ci est une des plus attractives du marché et sa forme de conditionnement en pastille facilite son installation dans les pièges. Le dispositif compte neuf pièges, soit un piège par parcelle élémentaire, positionnés au centre de la parcelle.

b. Stratégie de gestion de l'enherbement

Dans le système CO, l'enherbement est géré chimiquement via en moyenne une pulvérisation d'herbicides systémiques par cycle de production, en alternant deux molécules actives : fluazifop-P (Fusilade Max) et glyphosate (Touchdown S4) à 2 L/ha.

Dans les systèmes BI et BD, l'enherbement est géré par débroussaillage mécanique à dos, environ tous les mois. En complément, un à deux détourages (arrachage manuel des lianes enroulées aux bananiers) par an sont nécessaires dans les systèmes BI et BD pour gérer les lianes qui s'enroulent autour des bananiers.

c. Stratégie de gestion de la fertilisation azotée

Une fertilisation par de l'engrais minéral est apportée dans le système CO. Les deux principales formulations sont NPK 14-5-25 et 15-5-15. Les systèmes BI et BD ont été fertilisés par des engrais organiques de la marque AB'FLOR®. Le type d'engrais le plus appliqué est de formulation NPK 7-5-7 (homologué en Agriculture Biologique). Les quantités d'éléments nutritifs apportées par pied de bananiers et par cycle sont équivalentes dans chaque système : elles sont apportées en fractionné par des apports réguliers toutes les trois semaines.

4. Méthodes d'évaluation des systèmes

L'évaluation des niveaux de fourniture des SE étudiés dans chaque système est basée sur l'étude des indicateurs suivants : infiltrabilité du sol ; teneur en carbone du sol ; abondances de *C. sordidus* et *R. similis* ; niveaux de restitution de biomasse du couvert herbacé ; rendement. Le démarche d'évaluation vise ainsi à être la plus intégrative possible en caractérisant tous les compartiments du système bananier : le sol, les bananiers et le couvert herbacé (Figure 25).

a. Stratégie d'échantillonnage

Les mesures et prélèvements énoncés ci-après sont réalisés dans la zone centrale de chaque parcelle élémentaire, excluant une bande périphérique d'environ quatre mètres -soit deux rangs de bananiers- considérée comme une bordure potentiellement influencée par les pratiques de la parcelle avoisinante ; exception faite pour une mesure d'infiltrabilité et un prélèvement de sol dans le système BD, réalisés sur un inter-rang arboré situé en bordure. Les mesures et prélèvements sont réalisés au cours du quatrième cycle de production du dispositif BANABIO.

b. Mesures des propriétés du sol

Infiltrabilité du sol

L'infiltrabilité du sol est mesurée suivant la méthode Beerkan adaptée et décrite par Thoumazeau et al. (2019). Celle-ci consiste en la mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau à régime constant (i.e. saturation de la porosité), reposant sur la mesure du temps d'infiltration d'un volume et



Figure 26 : Mesure de l'infiltrabilité du sol suivant la méthode Beerkan

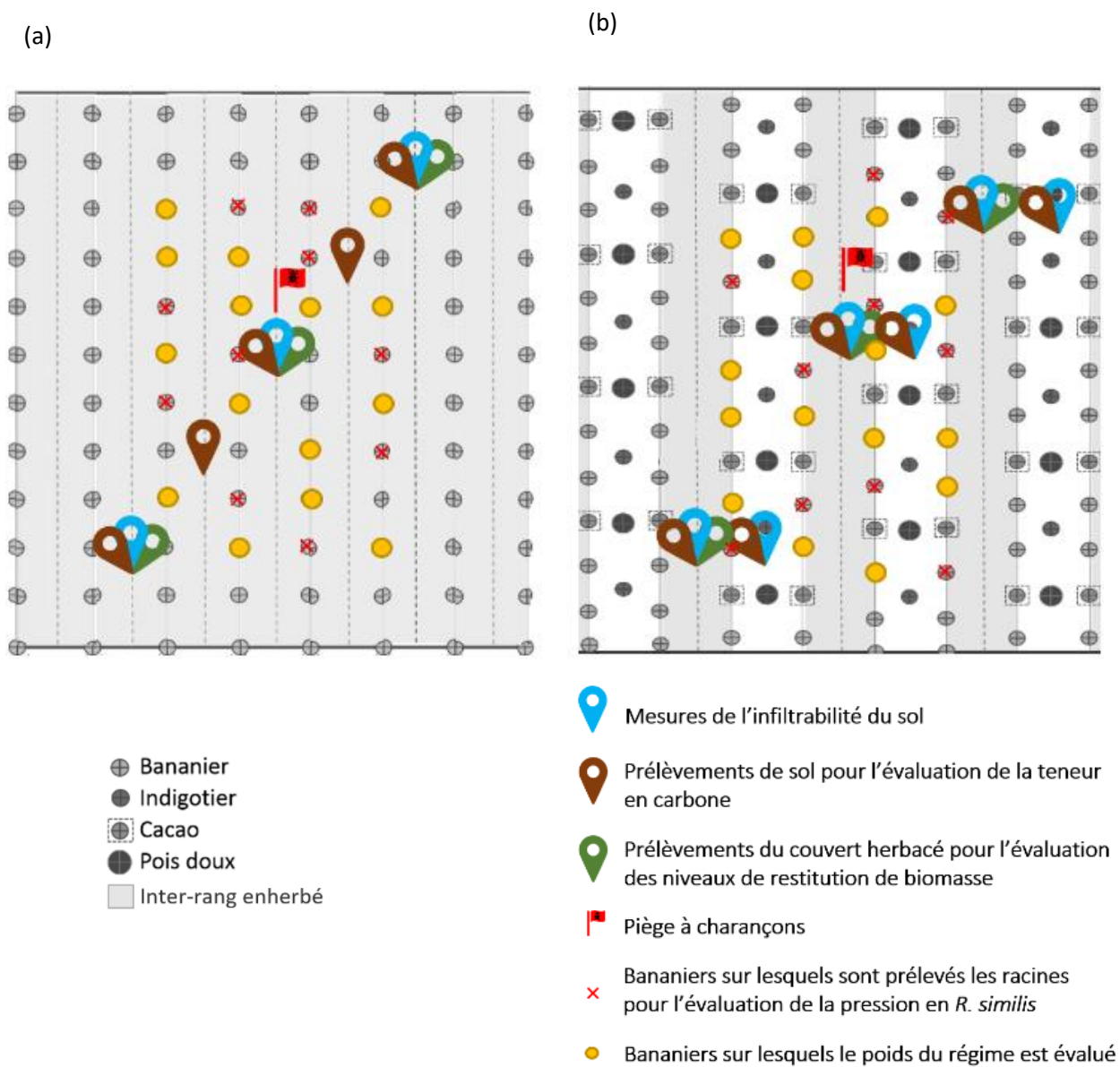


Figure 27 : Stratégie d'échantillonnage des (a) systèmes CO et BI (b) du système BD

hauteur d'eau connus. Ainsi, après avoir dégagé la surface d'infiltration au ciseau sans arracher la végétation, un cylindre de vingt centimètres de diamètre est enfoncé dans le sol. Après s'être assuré que celui-ci ne fuit pas sur les bords, le temps d'infiltration d'un volume d'eau fixe de 31,4 centilitres -équivalent à un millimètre pluviométrique sur cette surface d'infiltration- est chronométré. Afin d'éviter l'effet « splash », la surface du sol est protégée avec un film plastique percé lorsque le volume d'eau est versé dans le cylindre (Figure 26). L'opération est répétée dix fois, ou jusqu'à atteindre un régime d'écoulement constant correspondant à la saturation de la porosité du sol, qui est repérée lorsque le temps d'infiltration se stabilise. Cette dernière valeur est retenue, puis convertie en vitesse d'infiltration (mm/min puis mm/h). Dans les systèmes CO et BI, trois mesures par parcelle élémentaire, réparties en diagonale et localisées au milieu de l'inter-rang, sont réalisées. Pour le système BD, une mesure au milieu de chaque inter-rang prise à équidistance entre deux arbres de services et réparties suivant une diagonale est prévue dans chaque parcelle élémentaire, afin de présenter une donnée moyennée des mesures réalisées dans les inter-rangs arborés et non arborés (Figure 27).

Stockage de carbone dans le sol

- **Prélèvement des échantillons sur le terrain**

Les prélèvements de sol pour les analyses carbone sont réalisés à la tarière sur la couche de zéro à trente centimètres, au milieu de l'inter-rang (à équidistance entre deux arbres de services pour le système BD). Dans chaque parcelle élémentaire, un prélèvement par inter-rang suivant une diagonale est prévu. L'ensemble des prélèvements est mélangé dans un seau ; trois sous-aliquotes sont ensuite tirés de ce mélange.

- **Conditionnement et analyse des échantillons en laboratoire**

Les échantillons de sol sont ensuite séchés à l'étuve ventilée à 35°C pendant sept jours, puis tamisés à deux millimètres et passés au broyeur à bille (inférieur à deux-cents micromètres). Ils sont alors envoyés au laboratoire *UC Davis* (Californie, États-Unis) chargé des analyses de carbone/azote. Le carbone organique total est déterminé par combustion sèche d'échantillons de sol sec broyés à deux-cents micromètres, à l'aide d'un microanalyseur CHN (Carlo Erba NA 2000).

- **Calcul du stockage de carbone**

Les teneurs en carbone des sols sont alors converties en stock de carbone en multipliant les teneurs par la masse volumique apparente du sol sur zéro à trente centimètres (1g/cm³) pour ce type de sol (communication personnelle) et la profondeur prélevée. Le recueil des teneurs initiales de carbone dans chaque parcelle élémentaire avant la plantation des systèmes, soit au stade jachère après semis considéré comme l'état initial du système, a permis l'estimation des stocks de carbone initiaux.

Le stockage de carbone en quatrième cycle est ainsi calculé en réalisant la différence entre le stock de carbone en quatrième cycle et le stock de carbone initial au stade jachère.

c. Relevés réalisés au niveau des inter-rangs

Évaluation des niveaux de restitution de biomasse du couvert herbacé

- **Prélèvement des échantillons sur le terrain**

La restitution de la biomasse de couvert herbacé est évaluée par un échantillonnage qui prévoit trois quadrats de 0,25 m² par parcelle élémentaire, prélevés au milieu de l'inter-rang suivant une diagonale.

Le prélèvement est programmé le jour précédant la destruction du couvert : par désherbage chimique dans le système CO et par fauche mécanique dans les systèmes BI et BD. À ce titre, on part du principe dans cette étude que la biomasse de couvert restituée est la même lors de chaque fauche durant ce quatrième cycle (Tableau 1).

La composition majoritaire du couvert herbacé, qui distingue les lianes des graminées, est déterminée visuellement dans chaque quadrat, selon une notation qui désigne une majorité de lianes ou de graminées et de recouvrement de la surface du sol.

Les résidus contenus dans le quadrat sont ensuite coupés à l'aide de ciseaux ou de sécateurs.

- **Conditionnement et analyse des échantillons en laboratoire**

Ils sont ensuite transportés jusqu'au laboratoire dans des sachets hermétiques afin d'éviter leur dessiccation. Les échantillons sont enfin séchés dans une étuve ventilée à soixante-cinq degrés Celsius pendant sept jours, puis pesés, permettant de calculer la biomasse de matière sèche qui sera restituée en divisant cette masse par la surface du quadrat prélevée.

- **Calcul de la biomasse du couvert herbacé restituée par cycle**

La biomasse aérienne du couvert herbacé a ainsi été mesurée une seule fois au cours du quatrième cycle de production. Les valeurs moyennes de restitution sont ensuite multipliées par le nombre de destructions mises en œuvre dans chaque système (Tableau 1) afin d'estimer les restitutions totales par cycle de production provenant des couverts herbacés dans les trois systèmes.

Dans le système agroforestier BD, seuls les inter-rangs sans arbre sont enherbés, les inter-rangs arborés étant recouverts de résidus de taille qui étouffent le couvert ; seul un inter-rang sur deux est donc enherbé. Les relevés de quadrats sont ainsi réalisés uniquement dans les inter-rangs enherbés, c'est-à-dire ceux où il n'y a pas d'arbre de service. Les valeurs de biomasse obtenues pour chaque quadrat sont donc divisées par deux lors du traitement des données.

Évaluation de la pression en charançons

La pression en charançons est évaluée grâce au réseau de piègeages à phéromone qui couvre le dispositif. Le suivi des pièges est assuré tous les quinze jours, tout au long du cycle de production ; les individus sont dénombrés avant d'être retirés du piège. Il est admis que la fréquence de relevés des pièges à charançons n'influe pas sur le pouvoir attractif du piège.

La pression en charançons est estimée en cumulant le nombre d'individus piégés par parcelle dans les différents systèmes, tout au long du cycle de production.

d. Mesures réalisées sur les bananiers

Évaluation de la pression en nématodes phytophages

- **Prélèvement des échantillons sur le terrain**

La caractérisation du niveau de pression en nématodes phytophages se fait en évaluant le niveau d'infestation des racines des bananiers dans chaque parcelle. Pour ce faire, le prélèvement de racines dont sont extraits les nématodes phytophages fait l'objet d'un composite de dix bananiers par parcelle élémentaire. Ceux-ci sont sélectionnés aléatoirement parmi les bananiers qui se trouvent simultanément au stade floraison -toujours en évitant les bordures- et répartis de manière homogène, afin d'obtenir un échantillon représentatif de la parcelle.

Pour chaque bananier, le prélèvement est réalisé dans une zone aussi écartée que possible de la souche du cycle précédent (souche récoltée). Il se fait donc entre le pied-mère porteur du régime à récolter et le rejet, en sélectionnant un maximum de racines du pied-mère et non du rejet. Environ cinq racines de vingt-cinq centimètres de longueur sont prélevées par bananier, en veillant à écarter les racines de surface, desséchées et/ou nécrosées.

- **Conditionnement et analyse des échantillons en laboratoire**

Les racines sont stockées dans des sachets hermétiques afin d'éviter leur dessiccation. Au laboratoire, les racines sont pesées puis détruites par broyage en solution aqueuse pour extraire les populations de nématodes présentes. Les nématodes sont ensuite récupérés par centrifugation flottaison (Annexe III). Les individus extraits sont enfin dénombrés par rapport à la masse de racines détruites. Les nématodes sont ensuite identifiés ; l'identification taxonomique

d'un sous-ensemble d'individus est réalisée au microscope et basée sur des critères morphologiques.

Évaluation du rendement par bananier et par parcelle

Dans cette étude, deux indicateurs renseignent sur le rendement. Le premier est le poids moyen d'un régime de bananes. Cet indicateur traduit également un indice de la vigueur du bananier. Celui-ci est mesuré sur quinze bananiers par parcelle élémentaire, sélectionnés aléatoirement au centre de chaque parcelle élémentaire au moment de l'implantation du dispositif, puis suivis à chaque cycle de production. Sur chacun des quinze bananiers, le poids du régime -sans hampe- est mesuré à la récolte (poids frais). Ensuite, le pourcentage de perte par chute de régime sur les quinze bananiers suivis est calculé.

À partir de ces données, le rendement agronomique, exprimé en tonnes par hectare, est obtenu en multipliant la valeur du poids régime par la densité de plantation -1800 plants de bananiers par hectare pour les systèmes CO et BI contre 1200 pour le système BD-. Cette densité de plantation est corrigée par le pourcentage de perte de bananiers (i.e. non récoltés) observé pour ce cycle de production.

e. Traitement statistique des données

Le traitement statistique des données a été réalisé avec le logiciel *R* (version 4.1.2) à l'aide de l'interface *RStudio* (2021.9.0.351).

La significativité de l'effet système a été déterminée par une analyse de la variance du modèle linéaire (fonction *lm*) à un facteur (système) avec un seuil alpha de 0,05, pour les variables suivantes : infiltrabilité de l'eau dans le sol ; teneurs en carbone au stade jachère (état initial) et au quatrième cycle ; stockage de carbone ; biomasse de couvert enherbée restituée par destruction et par cycle ; poids régime et rendement en tonnes par hectare. Les conditions d'application ont été vérifiées graphiquement à l'aide des résidus du modèle. Lorsque le facteur explicatif s'est avéré significatif, un test post hoc a été réalisé afin de comparer la significativité des modalités entre elles (Tukey ; fonction *glht*, package « *multcomp* »). Une transformation logarithmique a été appliquée aux variables réponses, lorsque la normalité n'était pas respectée.

Prise en compte d'une potentielle dépendance spatiale des données

L'infiltrabilité de l'eau dans le sol, la biomasse de couvert enherbée restituée par destruction puis par cycle et la teneur en carbone au quatrième cycle sont des variables qui comportent neuf répétitions, soit trois répétitions par parcelle (quand les autres variables traitées n'en comportent que trois, soit une seule donnée par parcelle). La réflexion s'est alors portée sur la pertinence de tester l'effet parcelle afin de prendre en compte la potentielle dépendance des données, liée à leur spatialisation. Trois modèles ont donc systématiquement été testés : (i) un modèle linéaire à un facteur fixe (effet système) (fonction *lm*), (ii) un modèle linéaire hiérarchique à deux facteurs fixes (effets système et parcelle) qui tient compte de l'imbrication de l'effet parcelle dans l'effet système impliquant donc une corrélation entre les deux facteurs (fonction *lm*) (iii) et un modèle linéaire mixte avec l'effet système en facteur fixe et l'effet parcelle -imbriqué dans l'effet système- en variable aléatoire (fonction *lmer*, package « *lmerTest* »). Afin de respecter la normalité, une transformation logarithmique a été appliquée aux variables réponses.

Finalement, le manque de données entraîne un degré de liberté trop faible pour permettre la convergence du modèle linéaire hiérarchique à deux facteurs fixes ; par ailleurs, le modèle linéaire à un facteur fixe présente un critère d'information d'Akaike (AIC) -qui évalue l'erreur de prédiction d'un modèle et donc sa qualité relative- systématiquement plus faible comparé à celui affiché par le modèle mixte, traduisant une meilleure qualité du modèle. Le modèle linéaire à un facteur fixe (effet système) a donc été retenu, comme détaillé dans le paragraphe précédent.

Évolution temporelle de la teneur en carbone intra-système

L'évolution de la teneur en carbone entre le stade jachère (état initial) et le quatrième cycle a été évaluée au sein de chaque système. Les données étant potentiellement dépendantes (mesures répétées sur la même parcelle), deux modèles ont été systématiquement testés pour chaque système : (i) un modèle linéaire à un facteur (âge) ; (ii) un modèle linéaire mixte prenant en compte la parcelle en effet aléatoire. Sur la base de l'AIC, le modèle linéaire à un facteur (âge) a été retenu.

Cas de l'abondance des charançons

Les données d'abondance de charançon présentent une forte sur-dispersion en zéro. Afin de la prendre en compte, la loi négative binomiale a été utilisée pour les estimations (fonction `gml.nb`, package « MASS »). En amont, l'autocorrélation temporelle et spatiale ont été vérifiées : la fonction d'autocorrélation (ACF) a permis d'écarter le biais d'autocorrélation temporelle ; l'analyse variographique des résidus du modèle a permis de vérifier l'autocorrélation spatiale. Ici, les données étant très proches géographiquement, le variogramme n'a pas permis de tirer de conclusion. De ce fait, l'effet parcelle -imbriqué dans l'effet système- a été ajouté en effet aléatoire dans un modèle linéaire généralisé mixte (fonction `glm.nb`, package « lme4 »), mais au regard de l'AIC le modèle linéaire généralisé à un facteur (effet système) suivant une loi binomiale négative s'est avéré plus pertinent et a donc été retenu. Un test post hoc a ensuite été réalisé afin de comparer la significativité des modalités entre elles (Tukey ; fonction `glht`, package « multcomp »).

Analyse en composantes principales

Par ailleurs, une analyse des composantes principales (ACP), intégrant les variables étudiées : (i) maintien de la structure du sol, (ii) stockage de carbone dans le sol, (iii) régulation des bioagresseurs (iv) et rendement, a été réalisée pour visualiser les corrélations entre ces variables. Elle permet de projeter graphiquement les différents facteurs étudiés sur un seul plan et de générer un cercle de corrélation selon la contribution de chaque variable (package « factoextra »). Les effectifs étudiés sur la représentation graphique des facteurs sont une moyenne de trois relevés -un par parcelle- pour chaque système étudié.

Les scripts et sorties consoles des analyses statistiques sont consultables en Annexe IV.

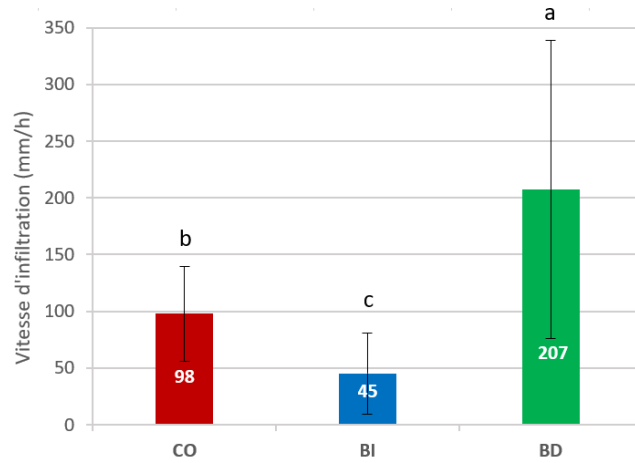


Figure 28 : Résultats des mesures d'infiltrabilité du sol (en mm/h) en fonction des systèmes. La valeur en blanc représente la moyenne traduite par l'histogramme. Les barres d'erreurs traduisent l'écart-type. Les systèmes ayant une lettre différente sont significativement différents (Test de comparaisons multiples de Tukey après transformation logarithmique) avec p -value $< 0,05^*$

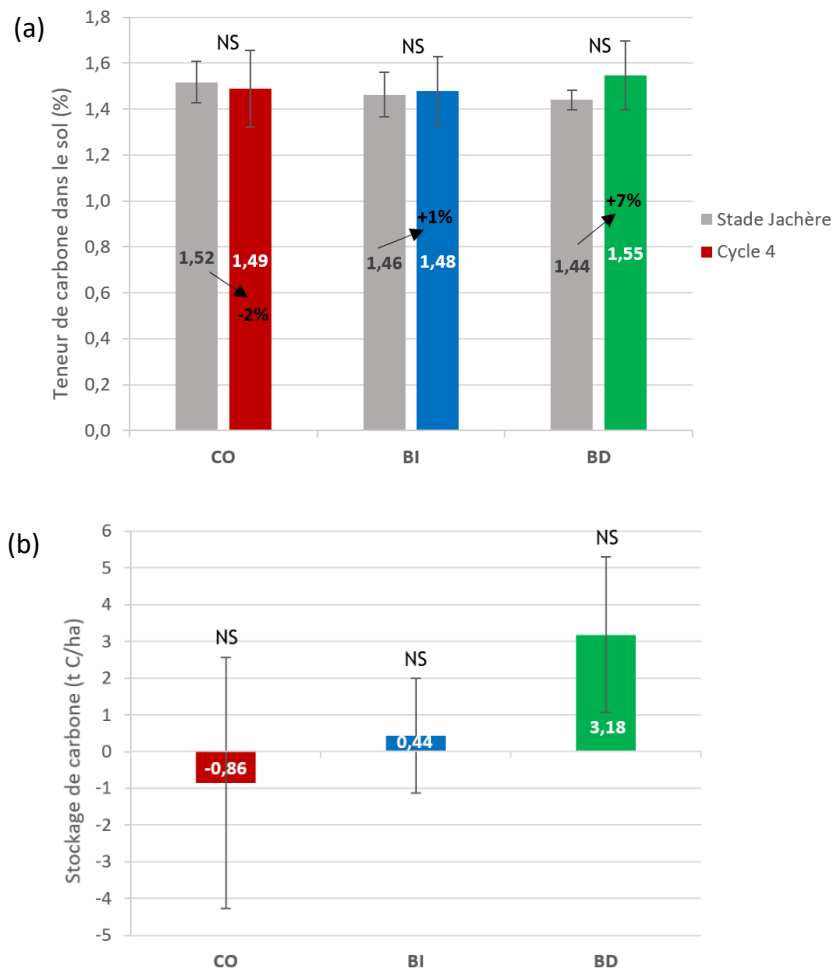


Figure 29 : (a) Résultats des mesures de teneurs en carbone du sol sur 0-30 cm (en %) en fonction des systèmes (b) Stockage de carbone sur 0-30 cm (en t C/ha) en fonction des systèmes. La valeur en blanc représente la moyenne traduite par l'histogramme. Les barres d'erreurs traduisent l'écart-type. NS : Non-Significatif

III – RÉSULTATS

1. Maintien de la structure du sol

La Figure 28 présente les résultats de vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol à saturation. Les trois systèmes affichent des vitesses d'infiltration de l'eau dans le sol significativement différentes les unes des autres. Le système BD témoigne d'une infiltrabilité deux fois plus élevée que le système conventionnel, avec une vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol de respectivement 207 ± 131 mm/h contre 98 ± 42 mm/h. Le système biologique intensif traduit l'infiltrabilité la plus faible, deux fois moindre par rapport au système conventionnel, avec une vitesse d'infiltration de 45 ± 36 mm/h.

2. Stockage de carbone dans le sol

La Figure 29 (a) présente les teneurs en carbone dans le sol mesurées au stade jachère - considéré comme l'état initial du système- et au quatrième cycle. Ainsi, au stade jachère, tout comme au quatrième cycle, on n'observe pas de différence significative entre les trois systèmes. Par ailleurs, si l'on s'intéresse à la différence entre les taux de carbone relevés au stade jachère et au quatrième cycle, au sein de chaque système, on n'observe également aucune différence significative. Cependant, des tendances se dessinent : le système BD semble traduire une différence de teneur en carbone entre le stade jachère et le quatrième cycle positive plus importante que les systèmes BI et CO, avec une augmentation de la teneur en carbone de 7% pour le système BD, quand le système BI n'affiche qu'une progression de 1% et le système CO une diminution de 2%.

Il en résulte un stockage de carbone nul pour CO et BI (avec respectivement $0,44 \pm 1,56$ t C/ha et $-0,86 \pm 3,41$ t C/ha), et positif pour BD ($3,18 \pm 2,13$ t C / ha) depuis la mise en place de ces systèmes, comme traduit la Figure 29 (b), bien que les différences entre les trois systèmes ne soient pas significatives.

3. Biomasse de couvert enherbé restituée

La Figure 30 (a) illustre la biomasse de couvert enherbé restituée à chaque destruction. Le système BI traduit un niveau de restitution de biomasse significativement plus élevé que celui du système BD, avec respectivement $1,7 \pm 0,9$ t MS/ha contre $0,8 \pm 0,4$ t MS/ha. En revanche, sa valeur n'est pas significativement différente du système CO ($1,3 \pm 0,5$ t MS/ha), qui ne diffère pas non plus significativement du système BD.

La Figure 30 (b) renseigne sur la biomasse de couvert enherbé restituée par cycle de production. Le système BI affiche alors une valeur significativement différente du système CO, soit huit fois plus élevée avec respectivement $10,3 \pm 5,2$ t MS/ha contre $1,3 \pm 0,5$ t MS/ha ; et significativement différente du système BD, qui traduit un niveau de restitution de biomasse de couvert enherbé par cycle deux fois plus faible que le système BI avec $4,8 \pm 2,4$ t MS/ha. Les niveaux de restitution de biomasse sont également significativement différents entre les systèmes CO et BD.

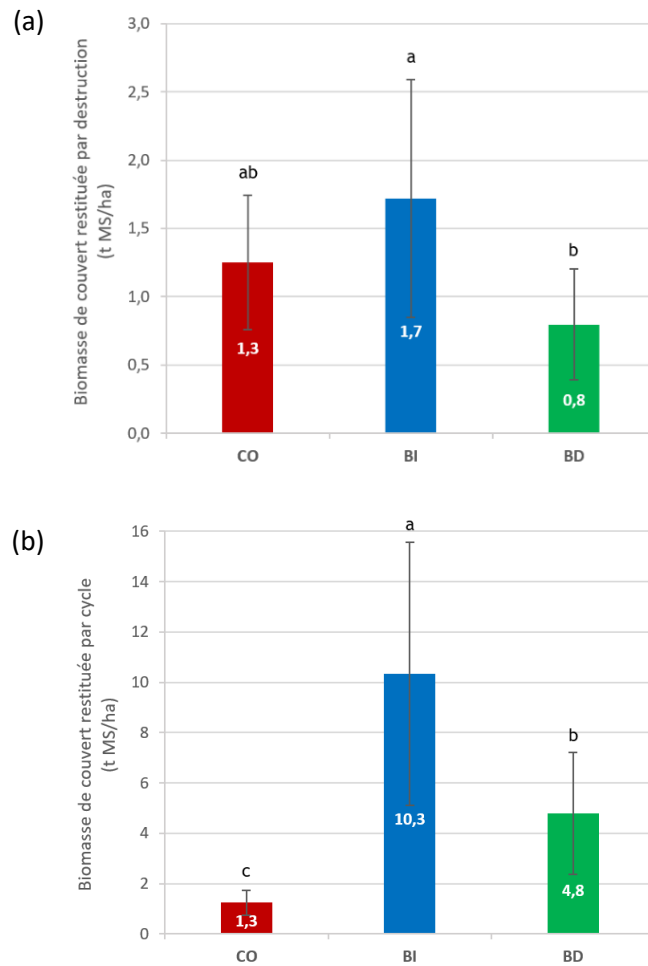


Figure 30 : (a) Résultats des mesures de restitutions de biomasse du couvert herbacé par destruction en fonction des systèmes (b) Résultats des mesures de restitutions de biomasse du couvert herbacé par cycle en fonction des systèmes. La valeur en blanc représente la moyenne traduite par l'histogramme. Les barres d'erreurs traduisent l'écart-type. Les systèmes ayant une lettre différente sont significativement différents (Test de comparaisons multiples de Tukey après transformation logarithmique) avec p -value < 0,01**

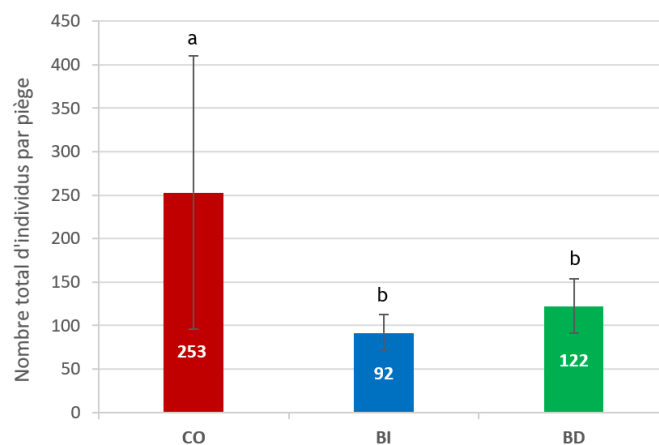


Figure 31 : Résultats de l'abondance de charançons par piège (cumul total d'individus par piège au cours du quatrième cycle de production) en fonction des systèmes. La valeur en blanc représente la moyenne traduite par l'histogramme. Les barres d'erreurs traduisent l'écart-type. Les systèmes ayant une lettre différente sont significativement différents (Tests de comparaisons multiples de Tukey) avec p -value < 0,001***

4. Régulation des bioagresseurs

a. Abondance du charançon *C. sordidus*

La Figure 31 traduit le cumul total de charançons par piège au cours du quatrième cycle. L'abondance des charançons piégés apparaît significativement plus élevée dans le système CO avec un total de 253 ± 157 individus piégés, contre 92 ± 21 dans le système BI et 122 ± 31 dans le système BD, qui ne sont pas significativement différents.

b. Abondance du nématode phytophage *R. similis*

La pression en *Radopholus similis*, nématode phytophage, est nulle dans les trois systèmes étudiés CO, BI et BD, au quatrième cycle de production.

5. Rendement

La Figure 32 (a) illustre le poids régime moyen en kilogrammes par pied de bananiers relevé dans chaque système étudié. Le système conventionnel affiche le poids régime le plus élevé avec $19,99 \pm 0,95$ kg/pied en moyenne, quand le système BI et BD affichent un poids régime légèrement moindre avec respectivement $17,80 \pm 0,99$ kg/pied et $16,69 \pm 0,42$ kg/pied.

La Figure 32 (b) traduit le rendement en tonnes par hectare, obtenu en multipliant le poids régime par les différentes densités de plantation des systèmes, corrigés par le pourcentage de perte observé au cours de ce cycle. Le système CO affiche le rendement le plus élevé avec $34,35 \pm 1,33$ t/ha. Le système BI affiche un rendement moindre avec $29,10 \pm 2,30$ t/ha. Le système agroforestier BD affiche un rendement 2 fois inférieur au système CO avec $17,80 \pm 1,99$ t/ha.

6. Analyse croisée des indicateurs étudiés

L'ACP permet d'expliquer 80,5% de la variance du jeu de données, dont 50,0% sont expliqués par la dimension 1 et 30,5% par la dimension 2 (Figure 33 a).

D'après le cercle de corrélation (Figure 33 b), chaque variable semble bien décrite par l'ACP.

Les trois systèmes sont répartis en trois pôles distincts. Ainsi, le système conventionnel CO est caractérisé par une forte abondance de charançons et un meilleur poids régime ; le système biologique BI présente le plus fort niveau de restitution de biomasse du couvert enherbé par cycle ; enfin le système agroforestier BD traduit la meilleure infiltrabilité du sol et le meilleur stockage de carbone qui semble covarier positivement avec l'infiltrabilité du sol

L'ACP semble traduire une covariation positive entre d'une part le stockage de carbone et l'infiltrabilité du sol ; d'autre part l'abondance de charançons et le poids régime.

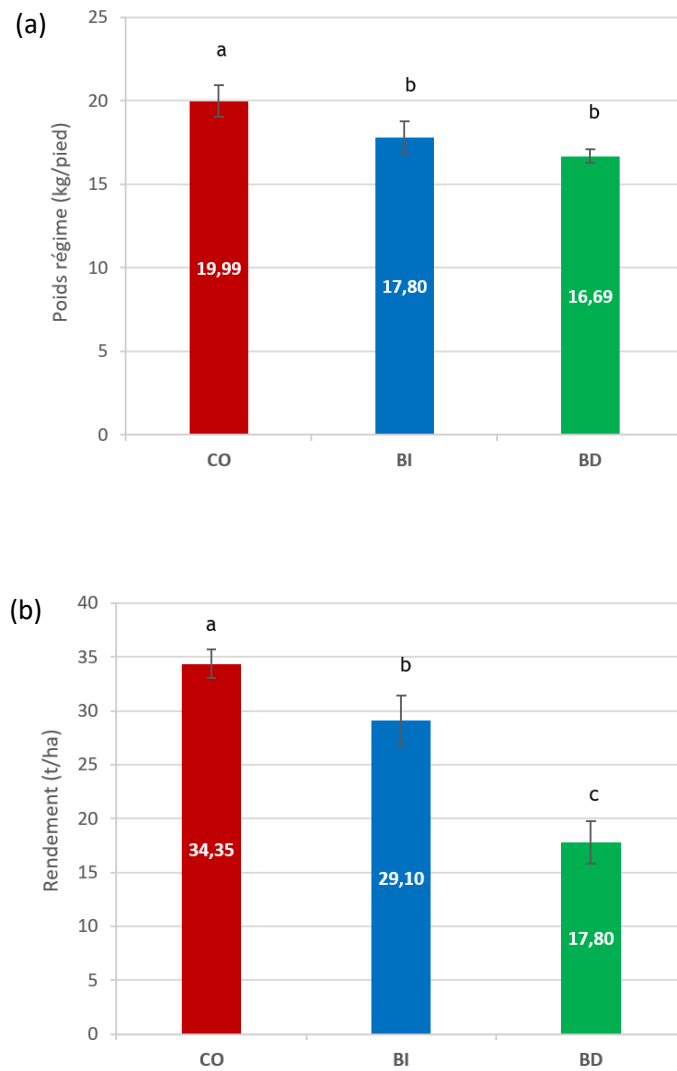


Figure 32 : (a) Résultats des mesures du poids moyen des régimes (en kg/pied) dans les trois systèmes (b) Rendement (en t/ha) des trois systèmes. La valeur en blanc représente la moyenne traduite par l'histogramme. Les barres d'erreurs traduisent l'écart-type. Les systèmes ayant une lettre différente sont significativement différents (Test de comparaisons multiples de Tukey après transformation logarithmique) avec p -value $< 0,05^*$

IV – DISCUSSION

Cette analyse met à l'étude un système bananier conventionnel CO et deux systèmes biologiques BI et BD en quatrième cycle de conversion à l'AB. Le système BI est un système biologique intensif qui repose essentiellement sur des stratégies d'optimisation des pratiques et de substitution des traitements chimiques par des intrants homologués en AB. Le système BD est un système biologique agroforestier qui, en plus des leviers alternatifs à l'utilisation de produits phytosanitaires déjà mobilisés dans le système BI, intègre la présence d'arbres en association de culture ou en plantes de service dans la bananeraie. Les trois systèmes marquent ainsi un gradient de complexification du système bananier, depuis une conduite conventionnelle vers un système biologique agroforestier totalement innovant. Il s'agit donc dans cette section d'interpréter (i) les différences entre les systèmes CO et BI qui traduisent les impacts de la conversion des systèmes bananiers à l'AB sur la provision de SE ; puis (ii) les différences entre les systèmes BI et BD qui permettent de comprendre les impacts de l'introduction d'arbres dans un système bananier biologique sur la fourniture de SE.

Dans cette discussion, l'utilisation de l'expression « conversion à l'AB des systèmes bananiers » sous-entend donc l'ensemble des éléments déclinés précédemment dans l'itinéraire culturel du système BI, à savoir notamment la présence d'une couverture végétale permanente induite par l'arrêt de l'utilisation d'herbicides substituée par une gestion de l'enherbement par fauches régulières et la substitution de la fertilisation minérale par de la fertilisation organique.

1. Impacts de la conversion des systèmes bananiers à l'AB sur la provision de SE

a. Impacts de la fauche régulière du couvert herbacé sur la restitution de biomasse

La substitution des herbicides par une fauche régulière du couvert enherbé a engendré de fortes différences fonctionnelles entre les deux systèmes. En effet, l'herbicide déployé dans le système conventionnel CO permet de maintenir un couvert inexistant à très faible pendant environ six mois. Ceci est notamment dû au mode d'action systémique de l'herbicide qui affaiblit les plantes traitées jusqu'à les tuer, retardant ainsi la repousse de la couverture végétale. Le sol reste donc presque nu pendant la majorité du cycle, hormis les quinze jours voire le mois qui précède le passage de l'herbicide. On a ainsi une seule destruction de l'enherbement par cycle de production, soit une seule restitution de résidus au sol.

En revanche, dans le système BI, la fauche du couvert herbacé est effectuée dès lors que le couvert atteint environ trente centimètres de hauteur soit environ une fois par mois ; en effet, la fauche régulière du couvert spontané stimulerait sa vigueur. À chaque destruction, le couvert est fauché à un ou deux centimètres de hauteur. On a donc une couverture du sol permanente, qui permet une protection continue de la surface du sol. L'entretien mensuel du couvert spontané assure, en outre, une restitution régulière des résidus au sol, au nombre de six pour le quatrième cycle de production.

b. Impacts de la conversion à l'AB sur la structure du sol

Contrairement à nos attentes, le sol du système conventionnel CO présente une infiltrabilité légèrement meilleure que celle du système BI. En effet, nous pensions que la présence d'une couverture végétale permanente dans BI -qui offre ainsi une meilleure protection de la surface du sol par rapport à CO- aurait permis une meilleure infiltration de l'eau dans le sol : d'une part le couvert permet d'intercepter les gouttes de pluie limitant ainsi la dégradation de la surface du couvert par effet « splash » ; d'autre part l'action des racines impactent positivement la macroporosité, assurant ainsi la bonne circulation de l'eau dans le sol (Dorel *et al.*, 2010 ; Gobat 2010 ; Bertrand *et al.*, 2019).

Ces résultats sont néanmoins à nuancer. Effectivement, d'après la classification de perméabilité du sol définie par la FAO (1996), les valeurs d'infiltrabilité du sol des systèmes CO et BI restent

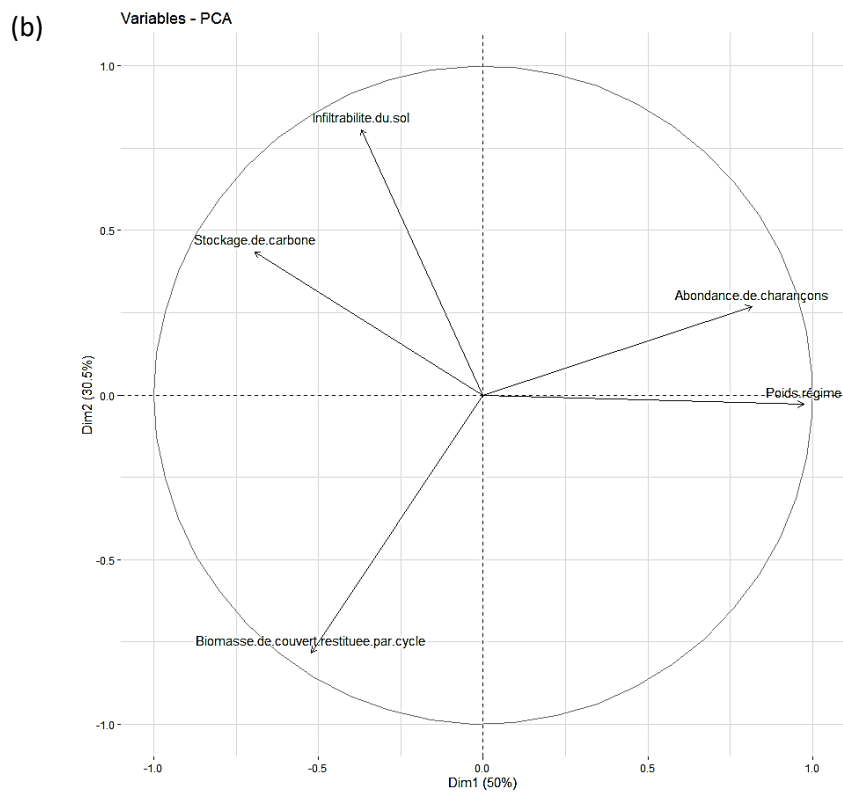
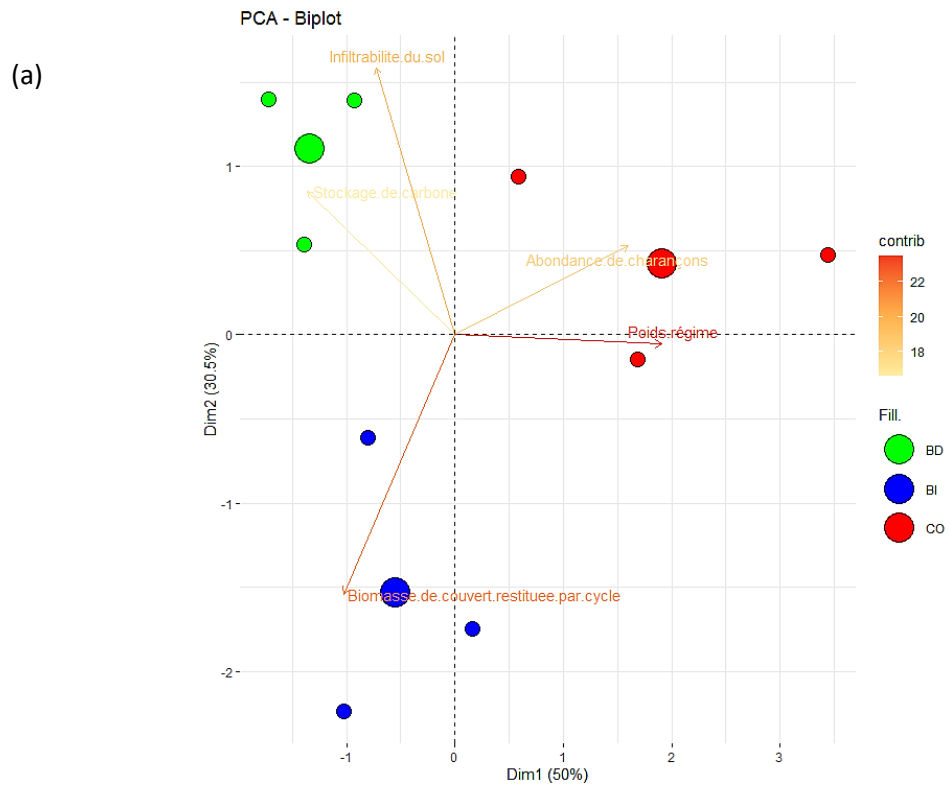


Figure 33 : (a) ACP des indicateurs étudiés et représentation des trois systèmes (b) Cercle de corrélation des indicateurs étudiés: infiltrabilité du sol, stockage de carbone, niveau de restitution de biomasse du couvert herbacé par cycle, abondance de charançons et poids régime

du même ordre de grandeur : les deux systèmes affichent une perméabilité similaire classée modérée à modérément forte.

D'autre part, ce résultat inattendu pourrait s'expliquer par la nature de la couverture végétale dans BI, notamment composée de graminées dont le réseau racinaire très dense pourrait avoir saturé la macroporosité, freinant ainsi l'écoulement de l'eau. C'est d'ailleurs ce qu'a supposé Rakotomanga *et al.* (2021) en observant une très faible infiltrabilité du sol sous une graminée (*Brachiaria decumbens*) au réseau racinaire très dense. S'ajoute à cela les interventions culturales beaucoup plus fréquentes dans le système BI -qui nécessite six passages pour la gestion du couvert- et qui impliquent un piétinement régulier de la parcelle ayant pu contribuer à tasser le sol.

c. Impacts de la conversion à l'AB sur le stockage de carbone dans le sol

En dépit de nos attentes, la conversion en AB n'a pas permis d'observer de stockage de carbone significatif après quatre cycles de production, tout comme dans le système CO. En effet, si les deux systèmes traduisent les mêmes niveaux de restitution de résidus de bananiers (environ 9 t MS/ha, communication personnelle) -feuilles et pseudos troncs-, on s'attendait à ce que les forts niveaux de restitution de biomasse herbacée dans le système BI comparé au système CO (respectivement 1,3 t/ha contre 10,3 t/ha) favorise le stockage de carbone (Chenu *et al.*, 2014). Il faut cependant considérer l'échelle de temps très restreinte de notre étude, le delta du stockage de carbone étant calculé sur quatre ans. En effet, Chenu *et al.* (2019) mettent l'accent sur le fait que le phénomène de stockage de carbone est lent, aussi la mise en place de pratiques doit être évaluée sur le long terme. Il serait donc intéressant de renouveler cette étude sur des pas de temps plus longs pour voir comment évoluent ces tendances.

d. Impacts de la conversion à l'AB sur la régulation du charançon *C. sordidus*

Bien que les deux systèmes suivent la même stratégie de lutte contre le charançon, à savoir le déploiement d'un réseau de piégeage à phéromones, l'abondance des charançons piégés est presque trois fois plus faible dans le système biologique BI que dans le système conventionnel CO. Ainsi, les résultats semblent confirmer notre hypothèse qui avançait que la diversification végétale des systèmes bananiers -en l'occurrence via la présence d'un couvert enherbé- favorise la biorégulation du charançon. Cela est certainement dû à l'effet de dilution (dans une parcelle cultivée la présence de plantes non hôtes du charançon réduit sa capacité à localiser et infester les plantes hôtes) auquel le charançon, ravageur spécifique, est particulièrement sensible (Poeydebat, 2016).

En outre, la présence d'une couverture végétale accroît les formes d'habitats et de ressources alimentaires, favorisant ainsi la présence d'une plus grande diversité de proies alternatives et donc de prédateurs du charançon. À ce titre, d'après Tresson (2021), la musaraigne asiatique *Suncus murinus* est le prédateur majeur du charançon adulte comptant pour 67% des éléments de prédation ; les autres prédateurs sont la souris domestique *Mus musculus*, le lézard oriental *Calotes versicolor* et le crapaud guttural *Sclerophrys gutturalis*. Les larves et œufs sont plutôt prédatés par les fourmis des espèces *Solenopsis geminata*, *Paratrechina longicornis* et *Technomyrmex albipes*, les blattes et les limaces. Il serait ainsi intéressant d'étudier les espèces présentes dans les différents systèmes afin d'identifier la présence potentielle de prédateurs du charançon et quantifier leur abondance.

Enfin, la complexification du paysage agricole, ici à l'échelle de la parcelle, par le maintien d'une plus grande biodiversité végétale, induit des barrières physiques naturelles qui pourraient freiner la progression du charançon. Dans ce sens, notre constat est cohérent avec les résultats préliminaires obtenus dans le cadre du projet BANAMOSAIC porté par le CIRAD, qui étudie la capacité de franchissement du charançon afin d'identifier les éléments du paysage (enherbement, haies, fractionnement du paysage, etc.) qui constitueraient des obstacles à la colonisation des bananeraies par le ravageur.

e. Impacts de la conversion à l'AB sur la régulation du nématode phytophage *R. similis*

Contrairement à nos attentes, la pression en nématodes phytophages *R. similis*, est nulle pour les systèmes CO et BI. Nous nous attendions à observer une accentuation de la prolifération du nématode phytophage *R. similis* dans le système biologique BI en raison de la présence d'un couvert enherbé qui aurait pu incarner une ressource trophique supplémentaire pour ces bioagresseurs généralistes (Poeydebat 2016). Cela vient finalement confirmer l'efficacité de la phase de jachère et de l'utilisation de vitroplants qui a précédé la plantation de la bananeraie et a assuré un assainissement optimal du sol, permettant ainsi de retarder efficacement l'infestation des bananeraies par les nématodes phytophages (Risède *et al.*, 2010). De plus, la terre agricole où est implanté le dispositif BANABIO n'avait pas connu de bananeraies depuis vingt-cinq ans (culture d'ananas). Il serait intéressant de renouveler nos observations dans des bananeraies plus âgées pour voir si ces effets sont suffisants pour perdurer tout au long de la vie de la bananeraie.

f. Impacts de la conversion à l'AB sur le rendement

Le poids moyen des régimes de bananes par pied traduit une différence significative entre le système conventionnel CO et le système biologiques BI, avec un poids moyen 15% plus faible pour le système biologique. La conversion à l'AB a donc entraîné une légère diminution du rendement par pied. D'après l'ACP, le poids régime et la biomasse restituée par le couvert enherbé ne semblent pas strictement corrélés, la présence du couvert ne semblerait donc être le seul élément qui induise une compétition avec les bananiers pour l'eau et les nutriments ; elle n'impacterait donc pas le poids moyen des régimes. En revanche, la substitution de la fertilisation minérale pour des amendements organiques, pourrait entraîner une perte de vigueur des bananiers, du fait que l'on ne maîtrise pas la vitesse de minéralisation des engrais organiques qui se révèlent donc moins efficaces, contrairement aux engrais minéraux qui sont tout de suite disponibles pour la plante.

Il faut également considérer l'effeuillage prophylactique dans le cadre de la gestion de la cercosporiose (non étudié dans notre analyse). En effet, le nombre moyen de feuilles à la récolte -très variable selon le cycle de production- au cours des trois premiers cycles était de 2,1 pour le système CO contre 1,4 et 1,1 respectivement pour les systèmes BI et BD. Effectivement, les traitements phytosanitaires utilisés en conventionnel pour lutter contre la cercosporiose se révèlent plus efficaces que les huiles minérales appliquées dans les systèmes conduits en AB. Un effeuillage plus conséquent dans BI, couplé à la substitution des engrais minéraux pour une fertilisation organique, entraineraient ainsi une perte de vigueur du bananier et peut donc participer à expliquer la diminution du poids des régimes à la récolte. Par ailleurs, le rendement exprimé en tonnes par hectare -indicateur qui reflète la productivité du système à l'échelle de la parcelle- traduit une diminution de 16,5% pour le système biologique BI par rapport au système conventionnel CO, comparable à celle observée pour le poids moyen des régimes (les deux systèmes ayant la même densité de plantation).

2. Impacts de l'introduction d'arbres dans les systèmes bananiers biologiques sur la fourniture de SE

a. Impacts de l'introduction d'arbres sur le niveau de restitution de biomasse du couvert herbacé

Les systèmes BI et BD suivent la même stratégie de gestion du couvert enherbé, c'est-à-dire une destruction mécanique et mensuelle. Cependant, la présence d'arbres de service un inter-rang sur deux dans le système agroforestier BD freine le développement du couvert spontané notamment en raison des résidus de taille laissés sur l'inter-rang qui semblent faire office de paillage et étouffent la couverture herbacée. C'est pourquoi le système BD affiche un niveau de restitution de biomasse du couvert enherbé deux fois moins important que le système BI. Il semble donc que la présence d'arbres dans les inter-rangs permette de maîtriser la pression du couvert. Cependant, dans le système BD une partie de la restitution des résidus enherbés est substituée par ceux de la taille des arbres. Les niveaux de restitution de résidus végétaux en tonnes par hectare sont donc tout de même équivalents entre les deux systèmes biologiques, seule leur nature diffère (communication personnelle). La fonction de protection du sol reste donc la même dans les deux systèmes, dans lesquels le sol n'est jamais laissé nu : elle est ainsi assurée par le couvert enherbé dans le système BI et par la couverture végétale ainsi que le mulch de résidus de taille des arbres dans le système BD.

b. Impacts de l'introduction d'arbres sur la structure du sol

D'après la classification de perméabilité du sol définie par la FAO (1996) (Annexe 5), le système BD traduit une forte perméabilité, se distinguant positivement du système BI dont la perméabilité est classée modérée à modérément forte. Ces résultats soutiennent notre hypothèse stipulant que la présence d'arbres, dont le réseau racinaire est plus perforant que celle des espèces herbacées, car de diamètre plus élevé, permettrait une meilleure infiltrabilité. En effet, Muchane *et al.* (2019) ont mis en évidence l'impact positif de l'agroforesterie sur l'infiltrabilité du sol. Cet effet a pu être renforcé par la différence de composition du couvert dans le système agroforestier par rapport au système BI, avec une plus faible présence de graminées au profit des lianes (observations non présentées) qui ont un réseau racinaire moins dense et sont donc moins à même de saturer la macroporosité du sol (voir section 4.1.b). La présence d'arbres explique certainement la différence de composition du couvert observée entre les deux systèmes, les lianes étant des plantes qui affectionnent les zones ombragées, alors que les graminées nécessitent une exposition directe au soleil.

c. Impacts de la présence d'arbres sur le stockage de carbone dans le sol

Contrairement aux systèmes BI et CO, et malgré des résultats non significatifs, nous avons observé une augmentation du stock de carbone dans le système agroforestier BD de 7%. Cela confirme notre hypothèse qui avançait qu'un système agroforestier est plus performant en termes de stockage de carbone organique qu'un système non arboré.

En effet, si les niveaux de restitutions de résidus végétaux sont équivalents entre les deux systèmes biologiques (voir section 4.2.a), leur nature diffère : résidus de bananiers -feuilles et pseudo-troncs- et du couvert herbacé dans le système BI ; quand le système agroforestier BD compte, en plus des résidus de bananiers, moins de résidus de couvert enherbé substitués pour moitié par les résidus de taille des arbres. Or, nous avons constaté qu'un niveau de restitution de biomasse du couvert enherbé plus important n'impacte pas significativement la capacité de stockage de carbone entre CO et BI. C'est donc la présence d'arbres qui doit être déterminante.

Cela s'expliquerait, d'une part, par le fait que les arbres participent à la régulation du microclimat, notamment grâce à l'ombre qu'ils projettent et qui limite les fluctuations de température et d'évaporation ce qui permet de favoriser l'activité biologique (Tschanstke *et al.*, 2011). D'autre

part, la présence d'un mulch permanent permet, d'assurer un abri et une ressource alimentaire continus à la faune (Bertrand *et al.*, 2019). Enfin, la structure racinaire des arbres qui permet des restitutions souterraines plus importantes que la structure racinaire des graminées. En effet, les racines meurent et se renouvellent sans cesse dans le sol ; de ce fait plus il y a de racines, plus il y a de restitutions de résidus végétaux en souterrain. De plus, les plantes à enracinement profond comme les arbres sont capables de mobiliser des éléments nutritifs dans des zones non accessibles aux racines du bananier (Allen *et al.* 2004, Jobbagy et Jackson 2004, Da Silva *et al.*, 2009). Une étude des restitutions souterraines par les racines serait donc également pertinente et permettrait d'identifier plus précisément la nature des interactions en cause dans le stockage de carbone.

D'autre part, l'arbre modifie également son environnement en améliorant notamment la structure du sol, le rendant plus vertueux dans sa capacité à stocker du carbone. En effet, la présence d'arbres peut aussi agir sur le stockage de carbone du sol de manière indirecte en favorisant la formation de macro-agrégats, plus à même de séquestrer le carbone que des agrégats plus petits. Bien que la proportion de macro-agrégats n'ait pas été mesurée dans cette étude, les mesures de physiques du sol réalisées -infiltrabilité- semblent soutenir cette hypothèse. Muchane *et al.* (2019) démontre, par ailleurs, que la présence d'arbres permet d'augmenter les macro-agrégats du sol de 22%.

Par ailleurs, malgré la non significativité des tendances observées, ces résultats sont d'ores et déjà prometteurs au vu du pas de temps très long de ce processus (Chenu *et al.*, 2019). Il faudrait donc étudier ce phénomène lorsque le système aura vieilli. En effet, le processus de stockage de carbone étant lent, il est probable que les effets s'accroissent avec le temps (Chenu *et al.*, 2019). Il faut cependant rester vigilant à maintenir une organisation des strates qui permette un développement optimal des essences cultivées. À ce titre, Bisseleua *et al.* (2009) souligne que la présence d'une strate supérieure à celle des cacaoyers, lui garantissant un ombrage permanent, augmente ainsi leur capacité de stockage de carbone.

d. Impacts de la présence d'arbres sur la biorégulation du charançon *C. sordidus*

La pression en charançons relevée dans le système BD n'est pas significativement différente de celle du système BI. Cela confirme notre hypothèse comme quoi la présence d'arbres -en complément d'une couverture végétale- n'influence pas la biorégulation du charançon. En effet, alors que très peu d'études se sont intéressées à l'impact de l'agroforesterie sur la biorégulation du charançon, Poeydebat (2016) a étudié l'effet des strates végétales -strate herbacée et strate arborée- dans les systèmes bananiers biodiversifiés sur ce facteur, en Martinique et au Costa Rica. Elle dresse alors un premier constat dans lequel elle met en évidence l'effet significatif de la richesse spécifique de la strate herbacée sur la biorégulation du charançon, quand la présence supplémentaire d'arbres n'améliore pas ce service.

e. Impacts de la présence d'arbres sur la biorégulation du nématode phytophage *R. similis*

Dans le système BD, la pression en *R. similis* est également nulle, bien que l'on ne s'attendait pas à observer d'effet de l'agroforesterie sur la biorégulation de ce nématode phytophage (Poeydebat, 2016).

f. Impacts de la présence d'arbres sur le rendement

L'absence de différence significative du poids moyen des régimes entre les systèmes biologiques BI et BD suggère un effet nul de compétition des arbres pour la lumière, l'eau et les nutriments sur la vigueur des bananiers. On peut, à ce titre, supposer que la présence de légumineuses dans le système BD compenserait une possible compétition. Ce facteur reste néanmoins à

surveiller au cours des prochains cycles de production, lorsque les arbres de service et cacaoyers continueront de croître.

Cependant, le système agroforestier affiche un rendement (en tonnes par hectare) à l'échelle de la parcelle 39% plus faible que le système biologique BI. Ceci s'explique par la densité de plantation de bananiers plus faible dans le système agroforestier, qui ne compte que 1200 plants/ha contre 1800 plants/ha pour les systèmes BI et CO. Cependant, cette perte de rendement en bananiers devrait être compensée par la diversification culturelle apportée par la valorisation du cacao produit en association de culture. Les cacaoyers sont rentrés en production pendant le cinquième cycle de production de la bananeraie ; la récolte est donc en cours.

3. Synthèse des forces et faiblesses soulevées par l'étude de ces trois systèmes

Les trois systèmes apparaissent très différenciés dans l'ACP, ce qui traduit des forces et faiblesses distinctes.

En effet, si le système conventionnel reste le plus productif, nécessite le moins de main d'œuvre -un seul passage d'herbicide par cycle de production pour gérer l'enherbement- et un coût à l'investissement moindre -fertilisation minérale moins chère et plus efficace-, il présente les niveaux de fournitures de SE les plus faibles des trois systèmes. En effet, ce système ne stocke pas de carbone, traduit une structure du sol moyenne et une très forte pression en charançons. Ainsi, malgré une entrée en production fructueuse en termes de rendement, le manque de SE risque d'affecter la durabilité du système : la qualité du sol pourrait se dégrader et la pression en bioagresseurs augmenter, précipitant le vieillissement de la bananeraie. S'ajoute à cela le coût environnemental et sanitaire lié à l'utilisation d'intrants chimiques, dont les effets néfastes sur les écosystèmes et la santé sont largement pointés du doigt.

Par ailleurs, la conversion du système bananier à l'AB a permis de maintenir un rendement tout à fait correct -dont la diminution par rapport au système CO reste modérée-, tout en favorisant la biorégulation du charançon. Le système bio-intensif traduit ainsi une pression en charançons bien moindre que celle observée dans le système conventionnel. La fourniture de ce SE a cependant été acquise au détriment des coûts de production qui ont augmentés, le système biologique avoisinant les +23% par rapport au système conventionnel à l'issue des trois premiers cycles (données en cours de traitement). L'augmentation de la nécessité de main d'œuvre liée à la gestion mécanique de l'enherbement, ainsi que les coûts d'approvisionnement des amendements organiques plus importants que ceux des engrais minéraux expliquent notamment ce surcoût. Pour pallier ces dépenses, on peut imaginer d'autres alternatives à la mécanisation comme par exemple l'introduction de moutons dans les bananeraies (Projet « Territoires Durables » mené en Guadeloupe par l'unité GECO du CIRAD). Par ailleurs, la fourniture en engrais organiques est une problématique majeure sur l'île : l'importation est limitée en quantité par le contexte insulaire du territoire et le coût d'approvisionnement élevé. Les matières premières locales ne sont généralement pas disponibles en quantité suffisante et prévisible, l'île n'étant pas une terre d'élevage. Le développement d'une filière de recyclage des déchets organiques à l'échelle du territoire permettrait de pallier en partie ce problème en réduisant le coût de la fertilisation. Cependant, il faut projeter ces investissements sur du long-terme : la diminution de la pression en bioagresseurs est l'assurance d'une durée de vie plus longue de la bananeraie en limitant la diminution de la vigueur des bananiers, garantissant ainsi, à termes, le maintien d'un rendement stable, quand celui d'un système conduit en conventionnel aura tendance à baisser.

Si ce système bio-intensif se révèle vertueux en termes de biorégulation des bioagresseurs, il ne permet cependant pas de fournir des SE de stockage de carbone, ni de maintien de la structure du sol.

Enfin, l'agroforesterie biologique présente des niveaux de fourniture de SE maximums par rapport aux deux précédents systèmes. En ce sens, si ce système -tout comme le système biologique intensif- favorise la biorégulation du charançon, il traduit un stockage de carbone plus

important et permet un très bon maintien de la structure du sol. De plus, le poids moyen des régimes à la récolte est équivalent à celui observé dans le système bio-intensif, il n'y a donc pas d'effet notable de compétition des arbres sur la vigueur des bananiers. La perte de rendement est due à une densité de plantation des bananiers plus faible, qui devrait être en partie compensée par la valorisation de la culture associée, le cacao. Cependant, celle-ci ne rentre en production que deux ans et demi après la plantation de la bananeraie ; il faut donc que le planteur puisse supporter ce manque à gagner pendant ce pas de temps. L'implantation et la gestion des cultures associées -cacaoyers et arbres de services- entraîne, par ailleurs, un coût d'investissement un peu plus élevé que pour le système bio-intensif (+7%, communication personnelle). Une analyse technico-économique de cette association de culture -bananiers et cacaoyers- est donc nécessaire pour étudier la manière dont le cacao biologique se valorise sur le marché et ainsi définir plus précisément les débouchés de vente possibles pour les producteurs et ce qu'ils peuvent en tirer en termes de rémunération. Par ailleurs, d'après les tendances de vente (données RNM), en 2021 la banane biologique semblait se valoriser en moyenne 26% plus cher que la banane conventionnelle.

La transition vers des systèmes bananiers biologiques agroforestiers permet donc de rétablir un équilibre écosystémique au sein des bananeraies, grâce à la mise en œuvre de pratiques culturelles plus vertueuses envers l'environnement et qui favorisent le retour de la biodiversité dans les agrosystèmes. Cela permet en conséquence l'augmentation du niveau de fourniture de SE, gages de durabilité des systèmes bananiers. De plus, dans un contexte de changement climatique alarmant, le stockage de carbone dans les sols agricoles apparaît comme un levier non-négligeable à l'atténuation des GES et constitue donc un SE essentiel. En effet, si en moyenne le carbone réside dans le sol pendant quelques décennies, la durée de stockage -temporaire- varie en réalité de quelques heures à plusieurs millénaires, et dépend des conditions de température, humidité, aération du sol et de la composition de la MO. On estime, à ce titre, que la quantité de carbone organique stockée dans les sols du monde représente deux à trois fois la quantité de carbone présente dans l'atmosphère sous forme de CO₂. En France métropolitaine, une augmentation d'un pour mille de ces stocks compenserait 12% des émissions agricoles et sylvicoles françaises ; une augmentation chaque année de la MO des sols agricoles de quatre grammes pour mille grammes de CO₂ compenserait l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre (GES) produits dans le monde en un an (Initiative 4 pour 1000). Favoriser une augmentation du stockage de carbone dans les agrosystèmes apparaît donc comme un levier d'action crucial pour l'atténuation du changement climatique. Celui-ci ne doit cependant pas être vu comme un levier de compensation des émissions de CO₂ liées aux activités agricoles, mais bien comme un levier supplémentaire parmi le portefeuille d'actions qui doivent être appliquées pour minimiser les émissions de GES. L'agroforesterie biologique est donc la conduite agricole la plus évoluée en termes de fourniture de SE et incarne l'innovation clé pour inscrire les systèmes bananiers dans un modèle durable.

V – LIMITES ET PERSPECTIVES

1. Les limites du dispositif expérimental

Si l'approche expérimentale sur des parcelles dédiées à la recherche permet une étude rigoureuse des SE, il serait intéressant de transposer cette étude chez des planteurs afin d'obtenir un panel d'observations davantage caractéristique des réalités du terrain. En effet, la taille restreinte des parcelles n'est pas représentative des surfaces cultivées chez des planteurs. D'autre part, la gestion culturale des systèmes suit sur BANABIO un cahier des charges très strict pour servir au mieux la démarche expérimentale, quand l'itinéraire cultural des planteurs est bien plus flexible et répond à d'autres contraintes : disponibilité de la main d'œuvre et des machines agricoles, etc.

Par ailleurs, la stratégie d'échantillonnage qui ne prévoit pour certains indicateurs que trois répétitions parcelles, mériterait d'être ajustée. Aussi, il pourrait s'agir de combler le manque de données par une analyse temporelle du dispositif, c'est-à-dire prenant en compte plusieurs cycles de production. Cette évaluation temporelle sur l'ensemble des cycles de production permettrait, en outre, de mettre en évidence la dynamique des SE évalués et l'influence du vieillissement de la bananeraie sur la fourniture de ces SE. Cela pallierait également aux variations climatiques pluriannuelles qui influencent la culture. On peut également songer à pallier au manque de données en multipliant les relevés et mesures sur plusieurs sites distincts ; en effet, le dispositif expérimental n'évalue finalement qu'un seul contexte pédoclimatique. Bien que dans notre étude la proximité géographique immédiate des parcelles ne semble pas impliquer de biais d'analyse, les observations tirées du dispositif BANABIO ne sont pas généralisables au territoire martiniquais. En effet, les indicateurs étudiés étant fortement dépendants du contexte pédoclimatique et paysager, il faudrait élargir l'étude à d'autres contextes environnementaux faisant notamment varier le type de sol, le contexte paysager, l'historique d'occupation du sol, etc.

2. Un dispositif expérimental encore jeune

Les résultats obtenus dans cette étude sont prometteurs mais la jeunesse du site n'a pas permis de capturer tous les processus étudiés. En effet, les arbres -notamment les cacaoyers- sont encore jeunes et rentrent tout juste en production. Il est donc encore tôt pour évaluer le stockage de carbone qui, qui plus est, est un processus lent. De plus, la première récolte de cacaoyers ayant lieu au cours du cinquième cycle, il n'est pas à ce jour possible de déterminer le niveau de valorisation de cette culture complémentaire. Par ailleurs, la pression en bioagresseurs est encore modérée seulement deux ans et demi après la plantation de la bananeraie. Une étude de la recolonisation des parcelles par les nématodes dans des bananeraies d'âge plus avancé permettra certainement d'étudier plus distinctement l'impact de la diversification végétale des systèmes bananiers sur la biorégulation des nématodes phytophages et de *R. similis* en particulier. Enfin, répéter cette étude sur les cycles de production suivant permettrait également d'obtenir un jeu de données plus conséquent et donc de limiter les biais soulevés dans la section précédente.

3. Une analyse économique indispensable à la valorisation des travaux

Enfin, une analyse économique, notamment concernant le système agroforestier BD, est indispensable à la valorisation de notre étude auprès des planteurs, à qui il faut garantir un amortissement des coûts engendrés par les pratiques innovantes proposées. Cette analyse doit se poursuivre sur du moyen et long terme pour évaluer la durabilité économique des systèmes.

VI – CONCLUSION

Dans un contexte d'éveil écologique des consciences grandissant, la société pointe du doigt les scandales environnementaux et sanitaires engendrés par des modes de culture sur-productivistes et clame son désir de changement. Et pour cause, une grande partie du secteur agricole est en proie à un mode de culture intensif destructeur, responsable d'un effondrement de la biodiversité -dont l'agriculture détermine une grande partie des conditions d'habitat- et d'une dégradation des écosystèmes. En outre, la FAO chiffre à 1,3 milliards de tonnes par an les pertes ou le gaspillage de denrées alimentaires produites dans le monde pour la consommation humaine, soit près du tiers de la production mondiale ; 51% des fruits et légumes produits n'arrivent pas jusqu'à l'assiette du consommateur ; la fourniture calorique induite par la production alimentaire mondiale dépasse de 23% les besoins (Gould, 2017). Et pourtant, le secteur agricole se livre à une course effrénée au rendement.

Alors, une transition dite « agroécologique » s'impose. Il est grand temps d'abandonner l'approche intensive qui prône un rendement maximisé quoi qu'il en coûte, pour repenser nos agrosystèmes et opérer une transition vers des modèles agricoles prônant résilience et durabilité. Il est grand temps de réconcilier agriculture et biodiversité. Et pour ce faire, l'évaluation des systèmes agricoles de demain ne doit pas simplement reposer sur le critère du rendement mais doit faire l'objet d'une évaluation multifactorielle qui place la biodiversité au cœur des systèmes d'étude. En ce sens, notre étude a permis de mettre en évidence le rôle de la diversification végétale dans la restauration d'interactions positives entre les composantes naturelles des agrosystèmes, au service de la fourniture de SE : maintien de la structure du sol ; stockage de carbone ; régulation des bioagresseurs. Ainsi, si la conversion à l'AB marque un pas dans la transition des systèmes bananiers vers des modes de gestion davantage résilients, l'agroforesterie semble indispensable à l'inscription des bananeraies dans des modèles agricoles gages de durabilité. Les surcoûts liés à l'approvisionnement en fertilisants organiques -découlant du manque de disponibilité des matières premières sur l'île- restent cependant une problématique à résoudre. Concernant ceux liés à la mécanisation de la gestion de l'enherbement, des alternatives sont en cours d'expérimentation.

Il faut également considérer la concurrence saillante de la banane dollar, qui pousse les producteurs à rendre leur production plus compétitive face à la concurrence internationale, en proposant des produits qui se démarquent sur le marché par leur qualité. De plus, impulsé par un contexte réglementaire et concurrentiel du marché mondial de la banane export favorable au développement d'une production inscrite dans le cahier des charges de l'AB, le marché du bio, certes plus segmenté, offre des perspectives de rémunération tout à fait intéressantes pour les producteurs. En outre, la France compte parmi les pays considérés comme moteurs historiques de la consommation de produits biologiques en Europe. La demande en produits biologiques et de proximité augmente et la banane occupe, à ce titre, le second rang du fruit biologique le plus consommé par les français comptant pour 15 à 16% de l'approvisionnement national total en bananes. En 2021, la part de marché de la banane biologique en Europe atteint les 12%, affichant plus de 790 000 tonnes importées (Loeillet 2022). S'ajoute à cela un contexte géopolitique en proie aux crises, dans lequel la fiabilité et la stabilité de l'approvisionnement alimentaire représentent un nouvel enjeu auquel la banane, produite en continu tout au long de l'année, pourrait répondre. En ce sens, la confiance envers le marché biologique européen prime par rapport au marché d'importation (Loeillet 2022).

Le marché de la banane biologique est donc une niche stratégique dont les planteurs martiniquais doivent se saisir, pour impulser le développement d'une filière banane biologique martiniquaise, voire antillaise. Si la phase d'expérimentation est indispensable à la mise au point d'itinéraires techniques viables, l'essor d'une filière banane biologique repose sur le transfert des connaissances acquises dans ce projet vers des exploitations pionnières volontaires ; et ce afin que les planteurs s'approprient ce mode de culture innovant, participant ainsi à l'émergence d'un réseau d'acteurs engagés dans la culture de bananes en systèmes biologiques diversifiés.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHARD, R., CABIDOUCHE, Y.-M., CARON, A., NELSON, R., DUFÉAL, D., LAFONT, A. et LESUEUR-JANNOYER, M., 2007. Contamination des racines et tubercules cultivés sur sol pollué par la chlordécone aux Antilles. *Les Cahiers du PRAM*. 2007. No. 7, pp. 45-50.
- ACHARD, R., FEVRIER, A. et ESTRADE, J.R., 2018. Weed control by two cover crops *Neonotonia wightii* and *Centrosema pascuorum* in banana plantations – impact on nitrogen competition and banana productivity. *Acta Horticulturae*. No. 1196, pp. 87-94. DOI 10.17660/ActaHortic.2018.1196.10.
- ARROUAYS, Dominique, BALESSENT, Jérôme et GERMON, J C, 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Rapport. pp. 335.
- BASILE-DOELSCH, Isabelle, BALESSENT, Jérôme et ROSE, Jérôme, 2015. Are Interactions between Organic Compounds and Nanoscale Weathering Minerals the Key Drivers of Carbon Storage in Soils? *Environmental Science & Technology*. Vol. 49, no. 7, pp. 3997-3998. DOI 10.1021/acs.est.5b00650.
- BERTRAND, Michel, BAROT, Sébastien, BLOUIN, Manuel, WHALEN, Joann, DE OLIVEIRA, Tatiana et ROGER-ESTRADE, Jean, 2015. Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 35, no. 2, pp. 553-567. DOI 10.1007/s13593-014-0269-7.
- BEUGNON, M. et CHAMPION, J., 1966. Etude sur les racines du bananier. *Fruits*. Vol. 21, no. 7.
- BOSSUYT, H., SIX, J. et HENDRIX, P. F., 2004. Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts: Incorporation of carbon in worm casts. *European Journal of Soil Science*. Vol. 55, no. 2, pp. 393-399. DOI 10.1111/j.1351-0754.2004.00603.x.
- BOSSUYT, Heleen, SIX, Johan et HENDRIX, Paul F., 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 37, no. 2, pp. 251-258. DOI 10.1016/j.soilbio.2004.07.035.
- CABIDOUCHE, Y.-M., ACHARD, R., CATTAN, P., CLERMONT-DAUPHIN, C., MASSAT, F. et SANSOULET, J., 2009a. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*. Vol. 157, no. 5, pp. 1697-1705. DOI 10.1016/j.envpol.2008.12.015.
- CABIDOUCHE, Y.-M., ACHARD, R., CATTAN, P., CLERMONT-DAUPHIN, C., MASSAT, F. et SANSOULET, J., 2009b. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*. Vol. 157, no. 5, pp. 1697-1705. DOI 10.1016/j.envpol.2008.12.015.
- CARDINAEL, Remi, 2015. Stockage de carbone et dynamique des matières organiques des sols en agroforesterie sous climat méditerranéen et tempéré. pp. 267.
- CAROF, M., DE TOURDONNET, S., COQUET, Y., HALLAIRE, V. et ROGER-ESTRADE, J., 2007. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*. Vol. 23, no. 3, pp. 230-237. DOI 10.1111/j.1475-2743.2007.00085.x.
- CARVAL, Dominique, RESMOND, Rémi, ACHARD, Raphaël et TIXIER, Philippe, 2016. Cover cropping reduces the abundance of the banana weevil *Cosmopolites sordidus* but does not reduce its damage to the banana plants. *Biological Control*. Vol. 99, pp. 14-18. DOI 10.1016/j.biocontrol.2016.04.004.

CASTAGNEYROL, Bastien, LAGACHE, Lélia, GIFFARD, Brice, KREMER, Antoine et JACTEL, Hervé, 2012. Genetic Diversity Increases Insect Herbivory on Oak Saplings. WRIGHT, Justin (éd.), *PLoS ONE*. Vol. 7, no. 8, pp. e44247. DOI 10.1371/journal.pone.0044247.

CASTRILLON, C., 1991. Manejo del picudo negro (cosmopolites sordidus germar) en platano y banano de la zona cafetera de colombia.

CHABRIER, C., 2008. *Survie et dissémination du nématode Radopholus similis (Cobb) Thorne dans les sols bruns-rouilles à halloysites (nitisols) : effets de l'état hydrique et des flux hydriques*. Ecole Doctorale Pluridisciplinaire de l'Université des Antilles et de la Guyane.

CHABRIER, C., MAULÉON, H., BERTRAND, P., LASSOUDIÈRE, A. et QUÉNÉHERVÉ, P., 2005. Banane antillaise, les systèmes de culture évoluent : en Martinique, méthodes alternatives pour réduire l'utilisation des nématicides et insecticides en bananeraies. *PHYTOMA*. Vol. 16, no. 584, pp. 12-16.

CHAMPION, J., 1963. *Le bananier*.

CHENU, Claire, ANGERS, Denis A., BARRÉ, Pierre, DERRIEN, Delphine, ARROUAYS, Dominique et BALESSENT, Jérôme, 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*. Vol. 188, pp. 41-52. DOI 10.1016/j.still.2018.04.011.

CHENU, Claire, KLUMPP, Katja, BISPO, A., ANGERS, D., COLNENNE, C. et METAY, Aurelie, 2014. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*. Vol. 37, pp. 23-37.

CLOSTRE, Florence, LETOURMY, Philippe, TURPIN, Baptiste, CARLES, Céline et LESUEUR-JANNOYER, Magalie, 2014. Soil Type and Growing Conditions Influence Uptake and Translocation of Organochlorine (Chlordecone) by Cucurbitaceae Species. *Water, Air, & Soil Pollution*. Vol. 225, no. 10, pp. 2153. DOI 10.1007/s11270-014-2153-0.

COQ, Sylvain, BARTHÈS, Bernard G., OLIVER, Robert, RABARY, Bodovololona et BLANCHART, Eric, 2007. Earthworm activity affects soil aggregation and organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues—An experimental study (Madagascar). *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 39, no. 8, pp. 2119-2128. DOI 10.1016/j.soilbio.2007.03.019.

CORD, Anna F., BARTKOWSKI, Bartosz, BECKMANN, Michael, DITTRICH, Andreas, HERMANS-NEUMANN, Kathleen, KAIM, Andrea, LIENHOOP, Nele, LOCHER-KRAUSE, Karla, PRIESS, Jörg, SCHRÖTER-SCHLAACK, Christoph, SCHWARZ, Nina, SEPPELT, Ralf, STRAUCH, Michael, VÁCLAVÍK, Tomáš et VOLK, Martin, 2017. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*. Vol. 28, pp. 264-272. DOI 10.1016/j.ecoser.2017.07.012.

CUILLÉ, J., 1950. *Research on the banana weevil, Cosmpolites sordidus Germ. Monograph of the insect and research on its chemotropisms*.

CUILLÉ, J. et VILARDEBO, A., 1963. Les calandrini nuisibles au bananier. In: *Entomologie appliquée à l'agriculture*. pp. 1098-1114.

DAMOUR, Gaëlle, OZIER-LAFONTAINE, Harry et DOREL, Marc, 2012. Simulation of the growth of banana (Musa spp.) cultivated on cover-crop with simplified indicators of soil water and nitrogen availability and integrated plant traits. *Field Crops Research*. Vol. 130, pp. 99-108. DOI 10.1016/j.fcr.2012.02.013.

DELATTRE, P., 1980. Recherche d'une méthode d'estimation des populations du charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus Germar (Col., Curculionidae)*. 1980.

- DELVAUX, Bruno, PERRIER, Xavier, GUYOT, P. et CIRAD-IRFA, 1990. Diagnostic de la fertilité de systèmes culturaux intensifs en bananeraies à la Martinique. *Fruits*. Vol. 45, no. 3, pp. 223-236.
- DOREL, Marc, 2001. *Effet des pratiques culturelles sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier*. Louvain-la-Neuve (BEL): Université Catholique de Louvain.
- DOREL, Marc, ACHARD, Raphaël et TIXIER, Philippe, 2008. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European Journal of Agronomy*. Vol. 29, no. 1, pp. 38-45. DOI 10.1016/j.eja.2008.02.004.
- DOREL, Marc, LAFFORGUE, A., BRETAUD, P. et LE BRETON, M., 1996. *Etude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. Projet Cordet 93 DA 14*.
- DOREL, Marc, LAKHIA, Steewy, PÉTÉTIN, Chloé, BOUAMER, Salah et RISÈDE, Jean-Michel, 2010. No-till banana planting on crop residue mulch: effect on soil quality and crop functioning. *Fruits*. Vol. 65, no. 2, pp. 55-68. DOI 10.1051/fruits/20010001.
- DOREL, Marc, PERRIER, Xavier et CIRAD-IRFA, 1990. Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. Enquête-diagnostic. *Fruits*. Vol. 45, no. 3, pp. 237-244.
- DROMARD, Charlotte R., BODIGUEL, Xavier, LEMOINE, Soazig, BOUCHON-NAVARO, Yolande, REYNAL, Lionel, THOUARD, Emmanuel et BOUCHON, Claude, 2016. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 23, no. 1, pp. 73-80. DOI 10.1007/s11356-015-4732-z.
- DUNCAN, L.W. et MOENS, M., 2006. Migratory Endoparasitic Nematodes. In: *Plant Nematology*. CAB International Edit. pp. 123-152.
- DUYCK, P.-F., DORTEL, E., VINATIER, F., GAUJOUX, E., CARVAL, D. et TIXIER, P., 2012. Effect of environment and fallow period on *Cosmopolites sordidus* population dynamics at the landscape scale. *Bulletin of Entomological Research*. Vol. 102, no. 5, pp. 583-588. DOI 10.1017/S0007485312000089.
- EHLER, Les, 1998. Conservation biological control. In: *Conservation Biological Control*. [en ligne]. Elsevier. pp. 1-8. ISBN 978-0-12-078147-8.
- FONTE, Steven J., BARRIOS, Edmundo et SIX, Johan, 2010. Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*. Vol. 155, no. 3-4, pp. 320-328. DOI 10.1016/j.geoderma.2009.12.016.
- FROGGATT, J.L., 1925. The banana weevil borer (*cosmopolites sordidus*).
- GANRY, Jacky, 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. *Comptes Rendus Biologies*. Vol. 327, no. 7, pp. 621-627. DOI 10.1016/j.crv.2004.03.009.
- GOLD, Clifford S, PENA, Jorge E et KARAMURA, Eldad B, 2001. Biology and integrated pest management for the banana weevil *Cosmopolites sordidus* (Germar) (Coleoptera: Curculionidae). pp. 77.

- GONZÁLEZ, D.N., 2018. Suitability of *Cordyceps bassiana* and *Metarhizium anisopliae* for biological control of *Cosmopolites sordidus* (Germar)(Coleoptera : Curculionidae) in an organic Mexican banana plantation : laboratory and field trials. *Journal of Plant Diseases and Protection*. pp. 73-81.
- GOULD, Julie, 2017. A world of insecurity. *Nature*. Vol. 544.
- GOWEN, S. R., 1995. Pests. In: GOWEN, S. (éd.), *Bananas and Plantains*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp. 382-402. ISBN 978-94-010-4317-5.
- GOWEN, S.R., QUÉNÉHERVÉ, Patrick et FOGAIN, Roger, 2005. Nematode parasites of bananas and plantains. *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture: Second Edition*. pp. 611-643. DOI 10.1079/9780851997278.0611.
- HUGON, R., GANRY, J. et BERTHE, G., 1984. Dynamique des populations du nématode *Radopholus similis* en fonction du stade de développement du bananier et le climat. *Fruits*. Vol. 39, no. 4, pp. 251-253.
- JACTEL, Hervé et BROCKERHOFF, Eckehard G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters*. Vol. 10, no. 9, pp. 835-848. DOI 10.1111/j.1461-0248.2007.01073.x.
- KHAMSOUK, Bounmanh et ROOSE, Eric, 2003. Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique. *Cahiers Agricultures*. Vol. 12, no. 3, pp. 145-151 (1).
- LAL, R., 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 70, no. 3, pp. 55A-62A. DOI 10.2489/jswc.70.3.55A.
- LASSOUDIÈRE, André, 2007. *Le bananier et sa culture*. Versailles: Éd. Quae. Savoir-faire. ISBN 978-2-7592-0046-7. 634.772
- LAVELLE, P., BIGNELL, D. et LEPAGE, M., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*. pp. 159-193.
- LEMAIRE, L., 1996. *Les relations sémiouchimiques chez le charançon *Cosmopolites sordidus* (Germar) (Coleoptera : Curculionidae) et la résistance de sa plante-hôte, le bananier*. Université des sciences et techniques du Languedoc.
- LOEILLET, D., 2017. Fruitrop Focus - Commerce international de la banane. No. 5, pp. 272.
- LOEILLET, D., 2022. Fruitrop - Dossier Banane. No. 281, pp. 112.
- LOOS, CLIVE A et LOOS, SARAH B, 1960. The Black-head Disease of Bananas (*Musa acuminata*). *Proceeding of the Helminthological Society of Washington*. Vol. 27, no. 2, pp. 189-193.
- LOPES, Rogério B., LAUMANN, Raul A., MOORE, Dave, OLIVEIRA, Márcio W. M. et FARIA, Marcos, 2014. Combination of the fungus *Beauveria bassiana* and pheromone in an attract-and-kill strategy against the banana weevil, *Cosmopolites sordidus*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. Vol. 151, no. 1, pp. 75-85. DOI 10.1111/eea.12171.
- MEAD, D.J., 2004. Agroforestry. Forests and Forest Plants. *Encyclopedia of life science systems*. Vol. 1, pp. 324-355.
- MESTRE, J. et RISÈDE, J.M., 1997. Les ravageurs de la bananeraie antillaise. Biologie et méthodes de lutte.

MOLLOT, Gregory, DUYCK, Pierre-François, LEFEUVRE, Pierre, LESCOURRET, Françoise, MARTIN, Jean-François, PIRY, Sylvain, CANARD, Elsa et TIXIER, Philippe, 2014. Cover Cropping Alters the Diet of Arthropods in a Banana Plantation: A Metabarcoding Approach. LUTHE, Dawn Sywassink (éd.), *PLoS ONE*. Vol. 9, no. 4, pp. e93740. DOI 10.1371/journal.pone.0093740.

MOLLOT, Gregory, TIXIER, Philippe, LESCOURRET, Françoise, QUILICI, Serge et DUYCK, Pierre-François, 2012. New primary resource increases predation on a pest in a banana agroecosystem. *Agricultural and Forest Entomology*. Vol. 14, no. 3, pp. 317-323. DOI 10.1111/j.1461-9563.2012.00571.x.

MUCHANE, Mary N., SILESHI, Gudeta W., GRIPENBERG, Sofia, JONSSON, Mattias, PUMARIÑO, Lorena et BARRIOS, Edmundo, 2020. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 295, pp. 106899. DOI 10.1016/j.agee.2020.106899.

MULTIGNER, Luc, NDONG, Jean Rodrigue, GIUSTI, Arnaud, ROMANA, Marc, DELACROIX-MAILLARD, Helene, CORDIER, Sylvaine, JÉGOU, Bernard, THOME, Jean Pierre et BLANCHET, Pascal, 2010. Chlordecone Exposure and Risk of Prostate Cancer. *Journal of Clinical Oncology*. Vol. 28, no. 21, pp. 3457-3462. DOI 10.1200/JCO.2009.27.2153.

O'BANNON, J. H., 1977. Worldwide dissemination of *Radopholus similis* and its importance in crop production. *Journal of Nematology*. Vol. 9, no. 1, pp. 16-25.

OKOLLE, N.J., NGOSONG, C., NANGANOA, L.T. et DOPGIMA, L.L., 2020. Alternatives to synthetic pesticides for the management of the banana borer weevil (*Cosmopolites sordidus*) (Coleoptera: Curculionidae). *CABI Reviews*. Vol. 2020, pp. PAVSNNR202015026. DOI 10.1079/PAVSNNR202015026.

PELTRE, Clément, CHRISTENSEN, Bent T., DRAGON, Sophie, ICARD, Christian, KÄTTERER, Thomas et HOUOT, Sabine, 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 52, pp. 49-60. DOI 10.1016/j.soilbio.2012.03.023.

POEYDEBAT, Charlotte, CARVAL, Dominique, DE LAPEYRE DE BELLAIRE, Luc et TIXIER, Philippe, 2016. Balancing competition for resources with multiple pest regulation in diversified agroecosystems: a process-based approach to reconcile diversification and productivity. *Ecology and Evolution*. Vol. 6, no. 23, pp. 8607-8616. DOI 10.1002/ece3.2453.

POEYDEBAT, Charlotte, TIXIER, Philippe, DE LAPEYRE DE BELLAIRE, Luc et CARVAL, Dominique, 2017. Plant richness enhances banana weevil regulation in a tropical agroecosystem by affecting a multitrophic food web. *Biological Control*. Vol. 114, pp. 125-132. DOI 10.1016/j.biocontrol.2017.08.009.

QUÉNÉHERVÉ, Patrick, CADET, Patrice et MATEILLE, Thierry, 1991. New approaches to chemical control of nematodes on bananas : field experiments in the Ivory Coast. pp. 7.

QUÉNÉHERVÉ, Patrick, CHABRIER, Christian, AUWERKERKEN, Annemie, TOPART, Patrick, MARTINY, Bernard et MARIE-LUCE, S., 2006. Status of weeds as reservoirs of plant parasitic nematodes in banana fields in Martinique. *Crop Protection*. Vol. 25, no. 8, pp. 860-867. DOI 10.1016/j.cropro.2005.11.009.

RAKOTOMANGA, Diane, 2021. *Effet de l'implantation d'une plante de services et des pratiques de gestion de la couverture végétale sur la communauté végétale accompagnatrice de la banane et les services qu'elle y rend*. Montpellier SupAgro.

- RAPIDEL, Bruno, RIPOCHE, Aude, ALLINNE, Clémentine, METAY, Aurélie, DEHEUVELS, Olivier, LAMANDA, Nathalie, BLAZY, Jean-Marc, VALDÉS-GÓMEZ, Héctor et GARY, Christian, 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 35, no. 4, pp. 1373-1390. DOI 10.1007/s13593-015-0317-y.
- RHINO, Béatrice, DOREL, Marc, TIXIER, Philippe et RISÈDE, Jean-Michel, 2010. Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus*: toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. *Agricultural and Forest Entomology*. Vol. 12, no. 2, pp. 195-202. DOI 10.1111/j.1461-9563.2009.00468.x.
- RIEUX, A, DE LAPEYRE DE BELLAIRE, L, ZAPATER, M-F, RAVIGNE, V et CARLIER, J, 2013. Recent range expansion and agricultural landscape heterogeneity have only minimal effect on the spatial genetic structure of the plant pathogenic fungus *Mycosphaerella fijiensis*. *Heredity*. Vol. 110, no. 1, pp. 29-38. DOI 10.1038/hdy.2012.55.
- RIPOCHE, Aude, ACHARD, Raphaël, LAURENS, Aude et TIXIER, Philippe, 2012. Modeling spatial partitioning of light and nitrogen resources in banana cover-cropping systems. *European Journal of Agronomy*. Vol. 41, pp. 81-91. DOI 10.1016/j.eja.2012.04.001.
- RISÈDE, Jean-Michel, ACHARD, R., BRAT, P., CHABRIER, C. et DAMOUR, Gaëlle, 2018. La transition agro-écologique des systèmes de culture de bananes Cavendish aux Antilles françaises. In: *La transition agro-écologique des agricultures du Sud*. Éd. Quae. pp. 107-126.
- RISÈDE, Jean-Michel, CHABRIER, Christian, DOREL, Marc, DAMBAS, Tino, ACHARD, Raphaël et QUÉNÉHERVÉ, Patrick, 2010. Protection intégrée contre les nématodes du bananier : enseignements tirés de l'étude de cas des Antilles françaises. pp. 8.
- RISÈDE, Jm et TÉZÉNAS DU MONTCEL, H., 1997. Systèmes monoculturaux bananiers et protection de l'environnement : état des lieux et perspectives. *Fruits*. Vol. 52, pp. 225-232.
- RUTGERS, M., VAN WIJNEN, H.J., SCHOUTEN, A.J., MULDER, C., KUITEN, A.M.P., BRUSSAARD, L. et BREURE, A.M., 2012. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of The Total Environment*. Vol. 415, pp. 39-48. DOI 10.1016/j.scitotenv.2011.04.041.
- SARAH, J.L., CHABRIER, C. et MESTRE, J., 1996. Méthode d'étude de l'efficacité en plein champ de nématicides destinés à lutter contre les nématodes des bananiers. *Méthode CEB*. No. 182, pp. 7.
- SIMMONDS, N.W., 1962. *The Evolution of the Bananas*.
- SIX, J, CONANT, R T, PAUL, E A et PAUSTIAN, K, 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*. pp. 155-176.
- SPONAGEL, K.W., DIAZ, F.J. et CRIBAS, A., 1995. El picudo negro del platano, *cosmopolites sordidus* germar. pp. 35.
- TABARANT, Perrine, VILLENAVE, Cécile, RISEDE, Jean-Michel, ROGER-ESTRADE, Jean, THURIES, Laurent et DOREL, Marc, 2011. Effects of four organic amendments on banana parasitic nematodes and soil nematode communities. *Applied Soil Ecology*. Vol. 49, pp. 59-67. DOI 10.1016/j.apsoil.2011.07.001.
- TIBI, Anaïs et THEROND, Olivier, 2017. Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFSE. pp. 123.

TINZAARA, William, GOLD, Clifford. S., DICKE, Marcel, VAN HUIS, Arnold, NANKINGA, Caroline M., KAGEZI, Godfrey H. et RAGAMA, Philip E., 2007. The use of aggregation pheromone to enhance dissemination of *Beauveria bassiana* for the control of the banana weevil in Uganda. *Biocontrol Science and Technology*. Vol. 17, no. 2, pp. 111-124. DOI 10.1080/09583150600937089.

TIXIER, P., DAGNEAUX, D., MOLLOT, G., VINATIER, F. et DUYCK, P-F., 2013. Weeds mediate the level of intraguild predation in arthropod food webs. *Journal of Applied Entomology*. Vol. 137, no. 9, pp. 702-710. DOI 10.1111/jen.12060.

TREVERROW, N., 1985. Banana weevil borer. 1985.

TREVERROW, N., PEASLEY, D. et IRELAND, G., 1992. Banana weevil borer: A pest management handbook for banana growers.

TREVERROW, N.L., 1993. An Integrated Management Program for Banana Weevil Borer. pp. 40.

TSCHARNTKE, Teja, CLOUGH, Yann, BHAGWAT, Shonil A., BUCHORI, Damayanti, FAUST, Heiko, HERTEL, Dietrich, HÖLSCHER, Dirk, JUHRBANDT, Jana, KESSLER, Michael, PERFECTO, Ivette, SCHERBER, Christoph, SCHROTH, Götz, VELDKAMP, Edzo et WANGER, Thomas C., 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review: Multifunctional shade-tree management. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 48, no. 3, pp. 619-629. DOI 10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x.

VILARDEBO, A., 1960. Los insectos y nematodos de las bananeras del ecuador. pp. 78.

VILARDEBO, A, 1973. Le coefficient d'infestation, critère d'évaluation du degré d'attaques des bananeraies par *Cosmopolites sordidus* GERM. le charançon noir du bananier. *Fruits*. Vol. 28, no. 6, pp. 417-426.

VILARDEBO, Anselme, BEUGNON, M., MELIN, Philippe, LECOQ, J. et AUBERT, Bernard, 1974. Chlordecone et autres insecticides dans la lutte contre le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus* Germ. *Fruits*. Vol. 29, no. 4, pp. 267-278.

CAMEROUN

VINATIER, Fabrice, 2009. Dynamique spatiale du charançon du bananier en interaction avec le système de culture et l'organisation paysagère. pp. 205.

VINATIER, Fabrice, TIXIER, Philippe, LE PAGE, Christophe, DUYCK, Pierre-François et LESCOURRET, Françoise, 2009. COSMOS, a spatially explicit model to simulate the epidemiology of *Cosmopolites sordidus* in banana fields. *Ecological Modelling*. Vol. 220, no. 18, pp. 2244-2254. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2009.06.023.

WISCHMEIER, Walter H. et SMITH, Dwight D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions, American Geophysical Union*. Vol. 39, no. 2, pp. 285. DOI 10.1029/TR039i002p00285.

WISCHMEIER, W.H. et SMITH, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses*.

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR

<p>Année universitaire : 2021 - 2022</p> <p>Spécialité : Horticulture</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p>Protection des Plantes et de l'Environnement en Horticulture - PPEH</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	--

ANNEXES

Par : Sarah COSTES



Soutenu à Angers le 6 septembre 2022

Devant le jury composé de :

Président : Nicolas CHEN

Autre membre du jury : Gaëlle DAMOUR

Maître de stage : Marie SAUVADET

Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

ANNEXE I - Histoire et origine du concept de services écosystémiques

1. Origine du concept de SE

Le terme de SE naît en 1970 dans un contexte de prise de conscience de notre impact sur les écosystèmes et d'interrogation de l'impact de la dégradation des écosystèmes pour notre société. La première définition de SE est posée dans une publication de Daily *et al.* de 1997 qui définit le concept comme les « conditions et processus à travers lesquels les écosystèmes naturels et les espèces qui les composent soutiennent et satisfont la vie humaine ». La même année, Costanza *et al.* complètent cette définition en précisant que les SE sont les « bénéfices dont les populations humaines dérivent, directement et indirectement des fonctions des écosystèmes ».

2. Création des premiers référentiels internationaux et européens

En 2000, une requête des Nations Unies aboutit à la création d'un consortium international pour évaluer les conséquences des changements des écosystèmes sur le bien-être humain et établir une base scientifique d'aide à la décision pour permettre la conservation et l'utilisation durable des écosystèmes et leur contribution au bien-être humain. Cette démarche débouche sur la publication du Millenium Ecosystem Assessment (MEA) en 2005, un premier référentiel international qui dresse une classification en quatre catégories des SE reliés aux constituants du bien-être (sécurité, santé, relations sociales, besoins matériels nécessaire à la survie) : (i) support (formation du sol, cycle des nutriments, etc), (ii) approvisionnement (bois, nourriture, eau, pétrole), (iii) régulation (climat, maladies, etc) (iv) et culture (ex: récréatif, éducatif, spirituel, etc). Le concept initial est donc défini à de larges échelles.

En 2007, une initiative mondiale -le TEEB (Économie des Écosystèmes et de la Biodiversité)- est déployée afin de démontrer les valeurs économiques de la biodiversité et des SE aux décideurs et de dresser une évaluation monétaire des services rendus par les écosystèmes.

S'en suit en 2012 la création de l'IPBES (Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les SE) qui cherche à évaluer l'état de la biodiversité et des SE qu'elle rend à la société, en réponse aux demandes des décideurs.

En 2013, le parution du CICES (Classification Internationale Commune des SE) permet de normaliser la description et l'évaluation des SE en harmonisant les référentiels de SE (MEA, TEEB et IPBES), donnant naissance à un référentiel par pays. En découle la création du référentiel d'Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques, dit EFESE. En parallèle le programme MAES instaure une cartographie et évaluation des écosystèmes et de leurs services pour quantifier et spatialiser les SE des territoires européens, publiée sous la forme de six rapports successifs entre 2013 et 2019.

Ainsi, depuis les années 90, le concept de SE est de plus en plus populaire dans la littérature scientifique avec plus de 1300 papiers mentionnant ce concept en 2014.

3. L'EFESE-EA un référentiel national des SE appliqué aux agroécosystèmes

Ce n'est qu'en 2017 que le référentiel national EFESE est adapté à l'évaluation des agroécosystèmes avec la publication de l'EFESE-EA (Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques - Écosystème Agricole) (Tibi et Therond, 2017). Il s'agit alors de promouvoir la conception de systèmes de production reposant davantage sur les SE, moins consommateurs en intrants exogènes et répondant aux enjeux de société, notamment en termes de conservation de la biodiversité et de limitation des impacts environnementaux.

Dans ce sens, l'EFESE-EA qualifie les SE comme « les processus écologiques (liés au vivant) ou éléments de la structure de l'écosystème dont l'Homme dérive des avantages -matériels (biens) ou immatériels (services)- (parfois en mobilisant du travail, capital matériel ou cognitif)

dans le but d'améliorer son bien-être ». L'EFESE-EA distingue ainsi deux catégories de destinataires avec les SE rendus à l'agriculteur dits SE « intrants », comme le maintien de la structure du sol ou la biorégulation des bioagresseurs ; et les SE rendus à la société dits SE « sociétaux », comme le stockage de carbone. Finalement, les SE sont donc les avantages que fournissent les composantes naturelles de l'écosystème à la société ou à l'agriculteur. Ces avantages doivent être (i) facilement quantifiables pour assurer une visibilité rapide du bénéfice pour l'agriculture ou la société ; (ii) servir d'outil de sensibilisation pour la préservation de la biodiversité. Ce référentiel a cependant été développé pour des agrosystèmes annuels et tempérés et nécessite donc des adaptations pour l'appliquer aux écosystèmes tropicaux.

ANNEXE II - Données climatiques du site expérimental

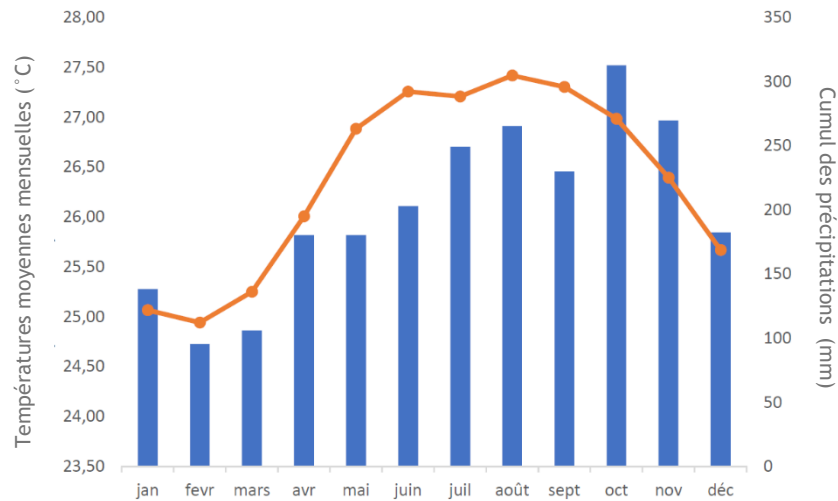


Figure 34 : Données climatiques du site expérimental de BANABIO de 1997 à 2007, station météo de Rivière-Lézarde (météo France). Les barres des histogrammes représentent les températures moyennes mensuelles (en °C). La courbe représente cumul des précipitations (en mm).

ANNEXE III - Protocole détaillé d'extraction des nématodes

Description des différentes étapes de la méthode d'extraction de nématodes par centrifugation-flottaison (modifiée par Coolen et d'Herbe, 1972), dans le but de dénombrer les nématodes contenus dans un échantillon de racine. Ce mode opératoire s'adresse aux chercheurs, ingénieurs, techniciens, VCAT et stagiaires. Cette méthode a pour principe l'utilisation de la densité des nématodes par rapport à l'eau et à une solution de sulfate de magnésium.

Le matériel

- Centrifugeuse avec godets de 250 ml
- Mixer
- Vibro mélangeur
- Batterie de tamis : 250 µm, 80 µm, 50 µm, 32 µm et un tamis de 5 µm
- Balance
- Planche à découper
- Couteau
- Passoire
- Becher de 250ml, 100ml
- Tubes gradués à 25, 50, 100 ml
- Microscopes
- Loupe binoculaire
- Cellule de comptage
- Densimètre
- Tout ce matériel se trouve salle 108 et 109

Les réactifs

- Kaolin réf : 24926364 Labover (*argile concassée qui sert à contenir les débris végétaux et les nématodes pendant les centrifugations*)
- Solution de sulfate de magnésium ($MgSO_4, 7H_2O$) réf 25165361SP Labover, soit 450 g (plus ou moins 1 g) pour un litre d'eau du robinet (*à défaut, on peut utiliser du sucre, soit 500 g/l plus ou moins 1 g*), afin d'obtenir une densité comprise entre 1.15 et 1.20.

Ces réactifs sont stockés dans la salle de réserve produits chimiques.

Étalon et Calibrage

Un contrôle mensuel de la solution de sulfate de magnésium est effectué à l'aide d'un densimètre (densité comprise entre 1.15 et 1.20).

Si la densité de la solution est inférieure à 1.15 on la réajuste en ajoutant un peu de sulfate de magnésium jusqu'à obtenir la densité voulue. Noter la nouvelle valeur sur la fiche.

Le matériel optique est contrôlé chaque année par la société LEICA.

Les balances sont contrôlées chaque année par la société BALCO.

Une étiquette est apposée sur ces appareils pour attester du contrôle, les fiches de maintenance sont gérées par le responsable maintenance.

Processus Opératoire

- **Enregistrement du prélèvement**

Les échantillons sont enregistrés suivant la procédure P-TE-01/NEMA.

- **Préparation de l'échantillon**

Laver les racines avec un jet puissant d'eau pour les débarrasser de la terre.

- Sur une planche, découper les racines en petits morceaux de 1 cm environ.
- Mettre les morceaux de racines dans une passoire, les laver à l'eau courante pour éliminer toute la terre.
- Bien homogénéiser le lot de racines.
- Prélever dans un petit Becher en plastique un aliquote d'environ 50 g de racines. Dans le cas où les échantillons ne peuvent être traités immédiatement, identifier l'échantillon. Conserver au frais.
- Remettre dans le sachet les racines non utilisées, garder environ deux semaines en cas de contrôle.

Extraction par centrifugation – flottaison

- Mettre dans le bol du mixer les racines pesées, ajouter 200 ml d'eau du robinet.
- Mixer 2 fois 30 secondes avec un intervalle de 5 secondes entre les 2 broyages.
- Verser le broyat sur une colonne de tamis : de bas en haut 32 µm, 50 µm, 80 µm, 250 µm, tamis préalablement mouillés. Bien rincer le bol du mixer au-dessus du tamis 250 µm.
- Tamiser pendant 2 mn avec un jet puissant sans éclabousser, le contenu du tamis 250 µm.
- Jeter le contenu du tamis 250 µm, puis laver, au-dessus du tamis 50 µm (jet très faible), le contenu du tamis 80 µm, par-dessus et par-dessous, en l'inclinant un peu afin de faire descendre doucement le contenu vers le bas.
- Récupérer le contenu du tamis 80 µm dans un godet de centrifugation 250 ml, dans lequel on aura mis au préalable 3 cuillères à café de KAOLIN.
- Faire de même pour les tamis 50 µm et 32 µm.
- Mettre en suspension à l'aide du Vibro mélangeur.
- Équilibrer précisément avec de l'eau distillée les godets 2 à 2 sur la balance.
- Centrifuger à 3000 tours / mn pendant 5 mn.
- Jeter le surnageant (eau).
- Ajouter 200 ml de sulfate de magnésium (*opérer rapidement car les nématodes supportent mal la pression osmotique du sulfate de magnésium*).
- Remettre le culot en suspension avec le Vibro mélangeur.
- Équilibrer précisément les godets 2 à 2 sur la balance avec du sulfate de magnésium.
- Centrifuger à 3000 tours / mn pendant 5 mn cf. I-M-01/NEMA
- Verser le surnageant sur un tamis de 5 µm préalablement mouillé.
- Laisser le tamis en place quelques minutes pour récupérer le sulfate de magnésium.
- Laver doucement (jet d'eau très faible) par-dessus et par-dessous, le tamis légèrement incliné.
- Récupérer le contenu du tamis (entonnoir) dans un tube gradué de 50 ml, à l'aide d'une pissette d'eau.

Comptage

- Mettre un bulleur dans le tube pour remettre en suspension les nématodes.
- Prélever environ 2 ml de cette suspension avec une pipette, monter en cellule de 1 ml. Compter au microscope ou à la loupe (cf. I-M-02/NEMA, I-M-03/NEMA, I-M-04/NEMA, I-M-05/NEMA) tous les nématodes présents dans le quadrillage (10 colonnesx8 lignes=1ml) et reporter le résultat sur la fiche E-TE-03NEMA.

Expression des résultats

1. Les critères de validation

Habilitation de l'opérateur suivant la procédure P-TE-02/NEMA

2. Les calculs

Appliquer la formule suivante pour avoir le nombre de nématodes contenus dans 100 g de racines.

$$\frac{\text{Nbre.de.nématodes} \times \text{volume}}{50\text{g.de.racines}} \times 100$$

3. La limite de détection

Le matériel optique est choisi d'après des critères stricts pour l'observation des nématodes.

Conditions de conservation et d'élimination des échantillons

Les échantillons (après 2 semaines environ) sont éliminés par le circuit normal des déchets ménagers.

Commentaires - Remarques

Refuser tout échantillon qui ne serait pas identifié correctement et qui ne serait pas accompagné d'un bon de commande.

ANNEXE IV - Scripts R et sorties consoles des analyses statistiques

```
### ANOVA à 1 facteur
theVar <- "Infiltration"
mod1<-lm(y ~ Systeme, data=filter(df, name==theVar))
summary(mod1)
AIC(mod1)

## Validation du modele

# Normalite des residus
par(mfrow=c(1,2))
hist (residuals(mod1)
      , col='red'
      , xlab='Valeurs des résidus'
      , ylab='Effectifs')
qqnorm(residuals(mod1)
        , col='red'
        ,pch=16)
qqline(residuals(mod1))

# Homogeneite des variances
par(mfrow=c(1,2))
plot(residuals(mod1)~fitted(mod1)
      , col='red'
      , pch=16)
x <- df %>%
  filter(name==theVar) %>%
  pull(Systeme)
boxplot(residuals(mod1)~ x,
         varwidth = TRUE,
         ylab = "Residus",
         xlab = "position",
         main = "")

# Individus influants
par(mfrow = c(1, 1))
plot(cooks.distance(mod1), type = "h", ylim = c(0, 1))
abline(h = 1, col = 2,lwd = 3)

#Autre approche graphique
par(mfrow = c(2,2))
plot(mod1,
      pch=16,
      col="red")

## Tests post-hoc de comparaisons multiples
library(multcomp)
mc_tukey<-glht(mod1, linfct=mcp(Systeme="Tukey"))
summary(mc_tukey)
```

Prise en compte d'une potentielle dépendance spatiale des données

```
### Modele mixte
library(lmerTest) #lmerTest car lme4 ne calcule pas la p-value
mod2 <- lmerTest::lmer(y ~ Systeme + (1|Systeme/Parcelle), data=filter(df, name==theVar))
anova(mod2)
summary(mod2)
AIC(mod2)
```

```
### ANOVA à 2 facteurs
mod<-lm(y ~ Systeme + Systeme/Parcelle, data=filter(df, name==theVar))
anova(mod)
summary(mod)
drop1(mod,test="F")
AIC(mod)
```

Évolution temporelle de la teneur en carbone intra-système

```
df <- df.raw %>%
  pivot_longer(cols = 2:3, names_to = "Age", values_to = "SC")
dfCO <- df %>%
  filter(grepl(pattern = "CO", x = Parcelle)) %>%
  mutate(P=as.factor(gsub(pattern = "CO", replacement = "", x = Parcelle)))
dfBI <- df %>%
  filter(grepl(pattern = "BI", x = Parcelle)) %>%
  mutate(P=as.factor(gsub(pattern = "BI", replacement = "", x = Parcelle)))
dfBD <- df %>%
  filter(grepl(pattern = "BD", x = Parcelle)) %>%
  mutate(P=as.factor(gsub(pattern = "BD", replacement = "", x = Parcelle)))
```

```
## ANOVA à un facteur (age)
flm <- formula(SC ~ Age)
modCO <- lm(flm, data=dfCO)
anova(modCO)
AIC(modCO)
modBI <- lm(flm, data=dfBI)
anova(modBI)
AIC(modBI)
modBD <- lm(flm, data=dfBD)
anova(modBD)
AIC(modBD)
```

```
## Modeles mixtes – non retenus
fglmm <- formula(SC ~ Age + (1|P))
modmCO <- lmerTest::lmer(fglmm, data=dfCO)
anova(modmCO)
AIC(modmCO)
modmBI <- lmerTest::lmer(fglmm, data=dfBI)
anova(modmBI)
AIC(modmBI)
modmBD <- lmerTest::lmer(fglmm, data=dfBD)
anova(modmBD)
AIC(modmBD)
```

Analyse de l'abondance des charançons

```
### Modeles mixtes - non retenus
library(lme4)
mod2 <- glmer.nb(y ~ Systeme + (1|Systeme/Parcelle), data=df)
anova(mod2)
summary(mod2)
AIC(mod2)
library(lme4)
mod3 <- glmer.nb(y ~ Systeme + (1|Date), data=df)
anova(mod3)
summary(mod3)
AIC(mod3)

### Modele lineaire generalise - Loi binomiale négative
library(MASS)
mod4 <- glm.nb(y ~ Systeme,data=df)
summary(mod4)
anova(mod4)

## Calcul de la surdispersion
E1 <- resid(mod4, type = "pearson")
N <- nrow(df)
p <- length(coef(mod4))
sum(E1^2) / (N - p)
plot(mod4,4)

## Validation du modele

# Normalite des residus (non attendue dans un modèle linéaire généralisé)
par(mfrow=c(1,2))
hist(residuals(mod4)
     , col='red'
     , xlab='Valeurs des residus'
     , ylab='Effectifs')
library(car)
qqp(residuals(mod4))

# Homogeneite des variances (non attendue dans un modèle linéaire généralisé)
plot(residuals(mod4)~fitted(mod4)
     , col='red'
     , pch=16)
abline(h = 0)
x <- df %>%
  pull(Systeme)
boxplot(residuals(mod4)~ x,
        varwidth = TRUE,
        ylab = "Residus",
        xlab = "position",
        main = "")

# Individus influants
par(mfrow = c(1, 1))
plot(cooks.distance(mod4), type = "h", ylim = c(0, 1))
abline(h = 1, col = 2,lwd = 3)
```

```
ggplot(data=dfStat, aes(x="Abondance_charancons")) +  
  geom_dotplot(method="histodot", binwidth=5,  
              stackgroups=T, stackdir="center")
```

```
hist("Abondance_charancons", data=dfStat, bindwidth=5)
```

```
# Autres approches graphiques
```

```
par(mfrow = c(2,2))
```

```
plot(mod4,  
     pch=16,  
     col="red")
```

```
## Tests post-hoc de comparaisons multiples
```

```
library(multcomp)
```

```
mc_tukey<-glht(mod4, linfct=mcp(Systeme="Tukey"))
```

```
summary(mc_tukey)
```

Analyse en Composantes Principales

```
ACP<-PCA(data[,4:8], scale.unit = TRUE, ncp = 5, graph = TRUE)
```

```
ACP$eig
```

```
fviz_eig(ACP, addlabels = TRUE, ylim = c(0, 50))
```

```
head(var$coord, 4)
```

```
fviz_pca_var(ACP, col.var = "black")
```

```
fviz_pca_var(ACP, col.var = "cos2",  
             axes=c(1,2),  
             gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),  
             repel = TRUE)
```

```
fviz_pca_ind (ACP, col.ind = "cos2",  
              gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),  
              repel = TRUE)
```

```
fviz_pca_ind (ACP, col.ind = as.factor(data$System),  
              addEllipses = TRUE,  
              repel = TRUE)
```

```
fviz_pca_biplot(ACP, repel = TRUE,  
                geom.ind = "point",  
                pointshape = 21,  
                palette = c("Green", "Blue", "Red"),  
                fill.ind = as.factor(data$System), col.ind = "black",  
                col.var = "contrib",  
                gradient.cols = "YlOrRd",  
                pointsize = 5)
```


ANNEXE V - Classes d'infiltrabilité du sol

<i>Classes de perméabilité du sol</i>	<i>Taux de perméabilité ¹</i>	
	<i>cm/heure</i>	<i>cm/jour</i>
Très faible	moins de 0,13	moins de 3
Faible	0,13 - 0,3	3 - 12
Modérément faible	0,5 - 2,0	12 - 48
Modérée	2,0 - 6,3	48 - 151
Modérément forte	6,3 - 12,7	151 - 305
Forte	12,7 - 25	305 - 600
Très forte	plus de 25	plus de 600

Figure 35 : Classes d'infiltrabilité (FAO, 1996)



Diplôme : ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

Spécialité : Horticulture

Spécialisation / option : Protection des Plantes et de l'Environnement en Horticulture (PPEH)

Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN

Auteur(s) : Sarah COSTES

Date de naissance* : 21/04/1998

Nb pages : 32

Annexe(s) : 5

Année de soutenance : 2022

Organisme d'accueil : Campus Agro-Environnemental Caraïbe (CAEC - CIRAD)

Adresse : Quartier Petit Morne - 97232 Le Lamentin Martinique

Maître de stage : Marie SAUVADET

Titre français : Évaluation de la fourniture de services écosystémiques dans des systèmes bananiers innovants conduits en Agriculture Biologique

Titre anglais : Evaluation of the provision of ecosystem services in innovative organic banana systems

Résumé : Depuis plus d'une dizaine d'années, bien que les systèmes de culture de bananes desserts conventionnels aux Antilles françaises soient engagés dans une transition agroécologique basée sur la réduction de l'usage de produits phytosanitaires, la conduite culturale de systèmes bananiers en Agriculture Biologique est peu maîtrisée. Notre étude, basée sur un dispositif expérimental implanté en Martinique, vise à dresser une évaluation multi-services de deux systèmes biologiques -un intensif et un agroforestier- comparés à un système conventionnel. L'étude s'intéresse aux bénéfices, dits services écosystémiques (SE), fournis par la biodiversité présente dans ces systèmes : maintien de la structure du sol, stockage de carbone dans le sol et régulation des bioagresseurs telluriques du bananier -le charançon *C. sordidus* et le nématode phytophage *R. similis*-. Ainsi, le système conventionnel traduit le meilleur rendement mais présente les niveaux de fourniture de SE les plus faibles. Le système biologique intensif affiche quant à lui un rendement moins bon que le système conventionnel, mais tout de même correct, et permet une meilleure régulation du charançon. Enfin, le système agroforestier traduit les meilleurs niveaux de fourniture de SE ; la perte de rendement par rapport au système biologique intensif s'explique par la substitution d'un tiers de la bananeraie par des cacaoyers.

Abstract: For more than a decade, although conventional dessert banana cropping systems in the French West Indies have been engaged in an agroecological transition based on the reduction of the use of phytosanitary products, the cultivation of organic banana systems has not been well mastered. Our study, based on an experimental set-up in Martinique, aims at establishing a multi-service evaluation of two organic systems - one intensive and one agroforestry - compared to a conventional system. The study focuses on the benefits, called ecosystem services (ES), provided by the biodiversity present in these systems: maintenance of soil structure, carbon storage in the soil and regulation of banana plant pests -the weevil *C. sordidus* and the phytophagous nematode *R. similis*-. Thus, the conventional system shows the highest yield but the lowest levels of ES supply. The intensive organic system shows a lower yield than the conventional system, but still correct, and allows a better regulation of the weevil. Finally, the agroforestry system shows the best levels of ES provision; the loss of yield compared to the intensive organic system is explained by the substitution of one third of the banana plantation by cocoa trees.

Mots-clés : Bananeraie, services écosystémiques, agriculture biologique, agroforesterie, bioagresseurs, sol, Martinique

Key Words: Banana plantation, ecosystem services, organic agriculture, agroforestry, pests, soil, Martinique

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires