



BANABIO : Evaluation de systèmes de culture innovants de BANAne BIOlogique

Claire-Marie ROHÉ^{1,2}, Inès FÉRON^{1,2}, Simon GIBERT^{1,2}, Fabrice LAMY^{1,2}, Elodie DOREY^{2,3},
Mathieu COULIS^{1,2}

1 CIRAD, UPR GECO, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France

2 GECO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

3 CIRAD, UPR GECO, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

Correspondance : claire-marie.rohe@cirad.fr

Résumé

La banane est le fruit le plus consommé et commercialisé au monde et représente la première filière agricole aux Antilles Françaises. De nombreuses recherches menées depuis une trentaine d'années ont permis le développement de nouvelles pratiques qui permettent la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires et de se rapprocher des objectifs des plans Ecophyto. Cependant, les références technico-économiques sur les systèmes bananiers sans intrants de synthèse manquent et de nouvelles pratiques agroécologiques telles que l'agroforesterie doivent être testées. Ainsi, dans le cadre de l'appel à projets DEPHY EXPE II, le dispositif BANABIO a été mis en place afin de déterminer les performances agronomiques, économiques et de gestion des ravageurs de systèmes de banane innovants (Cavendish, cv. Grande Naine). Deux systèmes biologiques ont ainsi été comparés à un système conventionnel : une monoculture (Bio-Intensif – BI) et une association banane – cacao avec l'utilisation de plantes de service ligneuses (*Cajanus cajan*, *Indofera zollingifera* et *Inga ingoides*). Dans cette expérimentation, nous avons suivi sur cinq années différents indicateurs de rendement, de gestion des bioagresseurs et une analyse des coûts de production a été réalisée. Les systèmes biologiques ont été moins productifs que le système conventionnel (poids moyen des régimes réduit de 15 % pour BI et de 28 % pour BD). Le système agroforestier semble toutefois plus résilient vis-à-vis de la cercosporiose noire et de ses impacts potentiels sur la durée de conservation des fruits (nombre de feuilles à la récolte similaire au système conventionnel et durée de vie verte des bananes plus longue de 2,5 jours). Le coût de production du système agroforestier a été le plus élevé (37 998 €/ha/an) et celui du conventionnel a été le plus faible (23 614 €/ha/an). Cette étude a permis de montrer que la production de banane biologique est possible aux Antilles Françaises et que de nouvelles pratiques comme l'agroforesterie sont prometteuses mais demandent une optimisation afin de réduire les coûts et améliorer la production.

Mots-clés : Agriculture Biologique, Martinique, système de culture, agroforesterie, cacao, rendement, coût de production

Abstract

The banana is one of the most consumed and traded fruits in the world and represents the leading agricultural sector in the French Antilles. Over the past thirty years, numerous studies have led to the development of new practices that reduce the use of pesticides and align with the goals of the government's Ecophyto plan. However, there is a lack of techno-economic references on banana farming systems without synthetic inputs, and new agroecological practices such as agroforestry need to be tested. Thus, within the framework of the DEPHY EXPE II project, the Banabio program was implemented to determine the agronomic, economic, and pest management performance of innovative banana systems (Cavendish, cv. Grande Naine). Two organic systems were compared to a reference conventional system: a monoculture (Bio-Intensive – BI) and a banana-cacao association using woody service plants (*Cajanus cajan*, *Indofera zollingifera*, and *Inga ingoides*). In this experiment, various yield indicators, pest management methods, and production costs were monitored over five years. Results show that organic systems were less productive than the reference conventional system (average bunch weight reduced by



15% for BI and 28% for BD). However, the agroforestry system appeared more resilient to black sigatoka and its potential impacts on physiological age of the fruit (similar number of leaves at harvest to the conventional system and banana green life duration extended by 2.5 days). The production cost of the agroforestry system was the highest (€37,998/ha/year), while the conventional system was the lowest (€23,614/ha/year). This study demonstrated that organic banana production is an achievable goal in the Lesser Antilles and that new practices such as agroforestry are promising but require optimization to reduce costs and improve yields.

Keywords: organic production, Martinique, cropping system, agroforestry, cocoa, yield, production cost

1. Introduction

Reconnue pour ses nombreuses qualités gustatives et nutritionnelles (Chandler, 1995), la banane (*Musa acuminata*) est le fruit le plus consommé et commercialisé au monde (Fruitrop, 2016). Elle est produite sur tous les continents de la zone intertropicale : en Asie, berceau historique des espèces du genre *Musa*, en Afrique mais également en Amérique Centrale et dans les Caraïbes. Dans les Antilles Françaises, les bananiers ont historiquement été utilisés comme plante d'ombrage et d'accompagnement dans les plantations de café et de cacao. Après le passage de cyclones dans les années 1930 puis de la crise du sucre en 1960, les planteurs se sont tournés vers cette plante à croissance rapide et à forte production, pouvant être exportée en métropole par les mêmes bateaux important de nombreuses denrées (Cantrelle et al., 2020). Ainsi, en Guadeloupe et en Martinique, la culture de banane dessert est devenue la première filière agricole, produisant et exportant jusqu'à 212 000 tonnes de banane en 2018 (Cantrelle et al., 2020). Ces deux îles étant françaises et leur marché d'exportation essentiellement tourné vers la métropole, les productions sont soumises à la réglementation française et européenne, régulant notamment l'usage des pesticides. Depuis le scandale du chlordécone (insecticide organochloré utilisé en bananeraie jusqu'en 1993 pour lutter contre le charançon, rémanent dans les sols contaminés et empêchant l'utilisation de ces surfaces pour un grand nombre de cultures sensibles) de nombreuses recherches et études ont été menées pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse (CIRAD, 2016).

De nombreux leviers ont ainsi été développés, permettant une réduction de 50 % de la quantité de matière active par hectare entre 2006 et 2015 (Risède et al., 2019). Les jachères assainissantes combinées à l'utilisation de vitroplants, matériel végétal indemne de bio-agresseurs permettent l'implantation des parcelles sans nématicide ; l'utilisation de pièges à phéromones contre le charançon du bananier permet de réguler les populations de ce ravageur sans insecticide ; l'usage de plantes de couverture et le développement d'outils mécaniques pour la gestion de l'enherbement réduisent les besoins en herbicide (Risède et al., 2019). L'usage de fongicides contre les maladies foliaires, historiquement modéré comparativement à d'autres zones de production (1 kg/ha/an dans les Antilles françaises contre 30 à 70 kg/ha/an dans d'autres parties du monde), grâce à la mise en place, dès le début des années 1970, d'une stratégie de contrôle raisonnée pour lutter contre la maladie de Sigatoka, ou cercosporiose jaune (Ganry et al., 2008), est resté limité, malgré l'arrivée en 2010 en Martinique et en 2012 en Guadeloupe de la maladie des raies noires du bananier (MRN), ou cercosporiose noire (de Lapeyre de Bellaire et al., 2010; Fouré & Ganry, 2008). L'arrivée de cette maladie beaucoup plus agressive que la cercosporiose jaune, pouvant causer des dommages importants sur le rendement et la qualité des fruits (mûrissements précoces), ainsi que l'évolution du contexte réglementaire (interdiction du traitement aérien (2012-2013) et de certaines molécules antifongiques curatives), ont nécessité l'adaptation de cette stratégie de lutte qui repose sur un système d'avertissement biologique géré par une cellule technique affiliée aux groupements de producteurs. Une attention accrue a ainsi dû être accordée à la mise en œuvre de pratiques agronomiques adaptées telles que l'effeuillage sanitaire, la gestion des stades de récolte, et les pratiques d'ablation de fruits (Risède et al., 2019). Cette stratégie intégrée a permis jusqu'à présent un contrôle convenable de la maladie malgré des difficultés importantes rencontrées par certains producteurs durant la saison cyclonique plus humide.



Les problématiques liées à la fertilisation sont également présentes : les engrais minéraux sont tous issus de l'importation, et les filières de production d'amendements locaux sont en cours de développement. Les engrais organiques n'ont cependant pas la même rapidité d'action : les nutriments, présents sous forme organique, doivent tout d'abord être minéralisés par l'activité biologique du sol afin d'être ensuite puisés par la plante. Cette minéralisation est contrôlée par de multiples facteurs biotiques ou abiotiques comme la température ou la disponibilité en eau du sol (Gutiñías *et al.*, 2012). De plus, le bananier a des besoins en eau importants (Carr, 2009) et les ressources hydriques sont convoitées : les surfaces irriguées augmentent, basées majoritairement sur les eaux de surfaces qui sont elles-mêmes affaiblies lors des sécheresses (DAAF, 2024).

Lorsque les contraintes de production en monoculture deviennent trop importantes et ne permettent pas de s'affranchir des pesticides, certains producteurs reviennent à des systèmes diversifiés comme l'agroforesterie, se détachant du système monoculturel conventionnel. En effet, l'intégration d'espèces supplémentaires au sein d'un système permet la diversification des productions mais également d'autres services écosystémiques tels que l'apport de matière organique, de l'ombrage et la fixation d'azote atmosphérique (Musongora *et al.*, 2023).

Néanmoins, de la monoculture conventionnelle à un système diversifié, un grand nombre de systèmes existent et cette diversité rend difficile l'étude de la combinaison des pratiques permettant la réduction de l'usage des produits phytosanitaires. Les objectifs fixés par le plan Ecophyto II visent à étudier la combinaison de ces pratiques afin de pouvoir établir des références techniques et économiques pouvant être transférées à la profession. Le projet BANABIO a ainsi été développé au sein du dispositif DEPHY Expé II, afin de comparer au système de production de banane conventionnel deux systèmes conduits sans produits phytosanitaires de synthèse, dont un en agroforesterie. L'objectif de l'étude est de collecter des données de performances agronomiques, économiques et environnementales dont l'analyse servira (i) de référence aux planteurs souhaitant effectuer une transition vers un système de production performant et plus respectueux de l'environnement et (ii) de vitrine de démonstration à destination de la profession et de la formation.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Site expérimental

Le site expérimental et les trois systèmes de culture ont été décrit par Coulis *et al.* (2022). Ici, seules les caractéristiques principales seront donc présentées.

Le dispositif BANABIO (Figure 1) est situé sur la station de recherche du CIRAD de Rivière Lézarde en Martinique (14°39'49"N 60°59'48"W, 46 m d'altitude). Le sol de la parcelle, cultivée depuis 25 ans avec une monoculture d'ananas, est classé parmi les nitisols, selon la WRB classification (Venkatapen, 2012). Le climat étant tropical humide, les années sont d'ordinaire rythmées par deux grandes saisons : le « carême » de janvier à mai avec une pluviométrie plus faible puis la saison cyclonique de juin à décembre, rythmée par des précipitations régulières et des températures élevées.

Pour cette expérimentation, neuf placettes d'environ 500m² chacune ont été disposées sur une parcelle d'environ 6 000 m². Chacun des trois systèmes (Conventionnel : CO, Bio-Intensif : BI et Bio-Diversifié : BD) est répété trois fois. Les neuf placettes ont été disposées de manière aléatoire sur la parcelle (Figure 1). Le dispositif est bordé au Nord-Est et au Nord-Ouest par une haie arborée, élaguée annuellement afin de minimiser les effets de compétitions sur l'essai, et la rivière Lézarde longe la parcelle par l'Ouest.

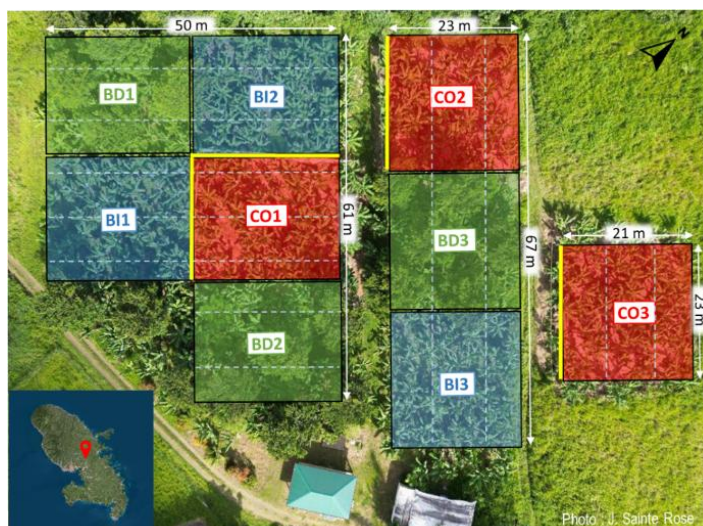


Figure 1 : Localisation du dispositif expérimental BANABIO en Martinique et implantation spatiale des différents systèmes étudiés (BD : Bio Diversifié ; BI : Bio Intensif ; CO : Conventioennel ; les chiffres 1, 2 et 3 permettent d'identifier les placettes par système ; les traits pointillés blancs représentent les lignes d'irrigation et les traits jaunes sont les filets anti-dérives).

2.2. Itinéraires techniques des trois systèmes

Le système de culture conventionnel (CO : Conventioennel), qui représente ici le système de référence, a été établi selon les pratiques généralement retrouvées dans les plantations martiniquaises : une monoculture de banane (*Musa acuminata* groupe AAA ; sous-groupe Cavendish, cv. Grande Naine) alliant certaines pratiques agroécologiques et l'utilisation de produits de synthèses. Le système de culture biologique (BI : Bio-Intensif) est également composé uniquement de bananiers mais respecte le cahier des charges de l'Agriculture Biologique (AB), avec l'utilisation d'intrants certifiés AB exclusivement. Le système de culture agroforestier (BD), développé lors d'un atelier de co-conception avec de nombreux acteurs de la filière, respecte également le cahier des charges de l'AB et met en place une association culturale banane-cacao avec l'utilisation de plantes de service ligneuses (*Cajanus cajan*, *Indofera zollingifera* et *Inga ingoides*). La jachère et l'implantation des systèmes sont décrites dans Coulis *et al* (2022). Les opérations culturales (œilletonnage, détourage, habillage du régime, effeuillage) ont été réalisées de la même manière sur l'ensemble des systèmes et selon les préconisations habituelles de la profession et sont décrites dans Coulis *et al* (2022).

Pour contrôler les populations de charançon du bananier, un piège commercial à phéromone de type "pitfall" (Delaplace, 2023) a été placé au centre de chaque placette, quel que soit le système. Les pièges ont été relevés toutes les deux semaines et les pastilles de phéromone (Cosmulture®, sordidine 270 mg ou 180 mg) changées respectivement tous les 90 jours ou 60 jours selon le dosage du produit.

La MRN a été gérée à l'aide d'un effeuillage sanitaire réalisé de manière hebdomadaire et ponctuellement à l'aide de produits phytosanitaires via une stratégie d'avertissement biologique adaptée de Fouré & Ganry (2008) afin d'optimiser la fréquence d'utilisation et le type de traitement. Pour cela, des postes d'observations composés de cinq bananiers ont été placés dans chacune des trois placettes de chaque système et ont fait l'objet d'un suivi hebdomadaire. Les produits et matériel utilisé ont été présentés dans Coulis *et al* (2022). En 2023, le fongicide de synthèse Consist® (trifloxystrobine, Bayer SAS, 0,15 L/ha) a également été utilisé en mélange avec de l'huile minérale paraffinique Banole 50® (Total) sur le système CO. La même année, sur les trois systèmes, l'agent de biocontrôle *Bacillus amyloliquefaciens* souche QST 713 a été utilisé sous forme de Rhapsody (2 L/ha, Bayer SAS), en mélange avec du Banole 50® à 15 L/ha et de l'eau (5 L/ha). A chaque application, des filets anti-dérives ont été déployés en fonction du vent dominant entre les placettes CO et les placettes BI et BD afin d'éviter toute dérive des traitements sur les placettes adjacentes.



La gestion de l'enherbement a été réalisée selon la méthode décrite dans Coulis *et al* (2022). Sur le système CO, les placettes ont été gérés chimiquement et sur les systèmes BI et BD, des désherbages mécaniques ont été réalisés à l'aide d'une débroussailleuse à dos.

Un épandage d'engrais a été réalisé toutes les trois semaines, manuellement, dans un rayon de 50 cm au pied des bananiers. Il n'y a pas eu d'apport sur les cacaoyers ou sur les arbres de service. Les plans de fumure étaient adaptés chaque année en fonction des résultats d'analyse de sol et de feuille et sont décrits dans le Tableau 1. Des engrais minéraux ont été utilisés sur le système CO et des engrais organiques sur les systèmes BI et BD. Des apports ponctuels d'amendements calciques ont également été réalisés en fonction du pH.

Tableau 1 : Apports annuels des trois systèmes

	2019	2020 - 2021	2022	2023
Conventionnel	291N - 104 P ₂ O ₅ - 416 K ₂ O	468N - 156 P ₂ O ₅ - 468 K ₂ O	388N - 129 P ₂ O ₅ - 388 K ₂ O	499N - 125 P ₂ O ₅ - 0 K ₂ O
Bio-Intensif	364 N - 156 P ₂ O ₅ - 780 K ₂ O	546N - 390 P ₂ O ₅ - 546 K ₂ O	445N - 318 P ₂ O ₅ - 445 6 K ₂ O	468N - 78 P ₂ O ₅ - 0 K ₂ O
Bio-Diversifié	243N - 104 P ₂ O ₅ - 520 K ₂ O	364N - 260 P ₂ O ₅ - 364 K ₂ O	297N - 212 P ₂ O ₅ - 297 K ₂ O	312N - 52 P ₂ O ₅ - 0 K ₂ O

2.3. Évaluations et mesures réalisées

L'ensemble des prélèvements et des mesures ont été réalisés dans la zone centrale des placettes, c'est-à-dire en excluant une bande de deux rangs de bananiers soit d'environ quatre mètres. Les mesures ont été réalisées sur 10 bananiers sélectionnés aléatoirement par placette durant le cycle 1 puis sur 15 bananiers par placette durant les cycles suivants (*i.e.* 45 bananiers par système).

En bananeraie, les performances agronomiques peuvent être évaluées par un grand nombre d'indicateurs. Dans cette étude, trois indicateurs principaux sont présentés : (i) le nombre de fruits à la floraison et avant ablation (indicateur du potentiel de rendement) ; (ii) la fréquence et la durée des récoltes de chaque cycle (indicateur de la rapidité de la production d'un système) et enfin (iii) le poids des régimes (indicateur de la productivité brute). Ainsi, pour chaque bananier suivi, le nombre de fruits par mains et par régime a été relevé à la floraison, date définie de manière hebdomadaire comme le passage des doigts de la dernière main au stade horizontale (Lassoudière, 2007).

L'âge physiologique du fruit, exprimé en degré-jour (°J) supérieur au seuil thermique de 14 °C, a été calculé à partir de la date de floraison selon la méthode décrite par Ganry et Meyer (1975). La récolte des régimes a été effectuée de façon à cibler un âge physiologique des fruits de 900 °J, mais celle-ci pouvait être avancée ou retardée d'une semaine afin d'atteindre un grade minimal. Celui-ci est calculé sur le doigt médian situé sur la face extérieure de la dernière main et doit être de 32 mm pour les systèmes BI et BD et de 34 mm pour CO. A la récolte de chaque bananier suivi, le nombre de feuilles vertes fonctionnelles, photosynthétiquement actives, a été relevé, puis le régime et sa hampe ont été pesés ensemble puis séparément. La durée de vie verte des fruits (DVV) a été mesurée sur les deux doigts médians de la troisième main de chaque régime selon le protocole décrit par Chillet *et al.* (2008), après une application d'Ortiva (azoxystrobine, 250 g/L, Syngenta) dans un bain à 2,4 mL/L d'eau.

Des mesures supplémentaires ont également été effectuées sur les placettes du système BD. Avant chaque taille, la hauteur des pois doux et des indigotiers, ainsi que la circonférence de leur tronc à 10 cm du sol, ont été relevées. La productivité des cacaoyers a été évaluée en récoltant les cabosses de l'ensemble des arbres. Celles-ci ont ensuite été ouvertes pour faire sécher les fèves et le mucilage à



l'étuve (70 °C, pendant une semaine). Enfin, les fèves séchées ont été pesées afin d'obtenir un indicateur du rendement.

L'analyse des coûts de production porte sur les cinq premières années de production du projet (2019-2023). Les coûts totaux sont exprimés en €/ha. Le choix s'est porté sur une analyse annuelle et non cyclique étant donné la désynchronisation des systèmes au cours de l'essai. Cette analyse s'est focalisée sur le coût de la main d'œuvre (heures travaillées x coût horaire) et le coût des intrants (quantités x prix). Elle a été réalisée principalement à partir d'un outil Excel où les opérations réalisées sur le site expérimental (date, description de l'opération, placettes travaillées, surface, nombres d'heures consacrés à l'opération, quantité et type d'intrants appliqués et matériels utilisés) ont été renseignés et les coûts calculés. Les données concernant les trois placettes de chaque système (heures de travail et quantités d'intrants) ont été sommées et extrapolées pour un hectare, à partir de la surface ou du nombre de bananiers de chaque système, selon le cas de figure. Pour certaines opérations culturales (œilletonnage, détournage, effeuillage), les heures de travail nécessaires ont été estimées à partir d'un débit chantier moyen d'une exploitation de bananes de Martinique. Le temps de travail dédié à la récolte des cabosses a, de la même façon, été estimé grâce au débit chantier moyen donné par la filière. Le coût du débroussaillage est exprimé directement en €/ha, celui de la fertilisation en tonne (d'engrais épandus) par hectare et ceux de la récolte et du soin aux fruits en €/régime. Toutes ces données complémentaires sont issues de la filière (planteurs antillais, BANAMART, Institut Technique Tropical, VALCACO). Les prix d'intrants proviennent majoritairement de la comptabilité de l'essai. Quand ils ne sont pas disponibles, ce sont ceux du groupement de producteurs de Martinique. Le coût horaire du travail effectif est une moyenne du SMIC horaire chargé depuis 2019.

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R (version 4.2.3). Pour chaque indicateur, un modèle mixte a été construit afin d'étudier l'interaction entre les systèmes et les années, avec les placettes en effet aléatoire. Le package emmeans, version 1.8.5 (Lenth, 2023), a ensuite été utilisé pour étudier, avec un test de Tukey, les différences entre les années ou entre les systèmes au sein d'une même année.

3. Résultats

3.1. Performances agronomiques

L'ensemble des résultats présentés ci-dessous sont basés sur les cinq années de mesures réalisées entre la plantation le 08/04/2019 et le 05/04/2024. Pour les trois systèmes de culture, la récolte des régimes de bananes du premier cycle cultural a débuté le 17/12/2019, soit huit mois après la plantation.

En comparaison avec le système de référence conventionnel (CO), le nombre moyen de fruits par régime était 9% inférieur dans le système BI et 20% inférieur dans le système BD (Tableau 2).

Tableau 2 : Nombre moyen de fruits par régime avant l'ablation des dernières mains, à la floraison. Les moyennes ont été calculées sur l'ensemble des régimes de chaque système, le nombre de régimes mesuré est indiqué dans la parenthèse. Les lettres en italique indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (p-value < 0,05).

Système de culture	Nombre moyen de fruits par régimes
Conventionnel	191,0 ± 3,7 <i>c</i> (n = 306)
Bio-Intensif	172,9 ± 1,5 <i>b</i> (n = 278)
Bio-Diversifié	153,4 ± 5,4 <i>a</i> (n = 239)

En moyenne sur l'ensemble des cinq années, le nombre de doigts, indicateur du potentiel de rendement, a été 20 % et 9 % inférieur sur les systèmes BD et BI comparé au système CO, dont les régimes comportaient en moyenne 191 doigts.

En moyenne, le nombre de mois entre les médianes des dates de récolte de deux cycles consécutifs est de 7,0 mois pour CO, 7,9 mois pour BI et 8,2 mois pour BD (Figure 2).

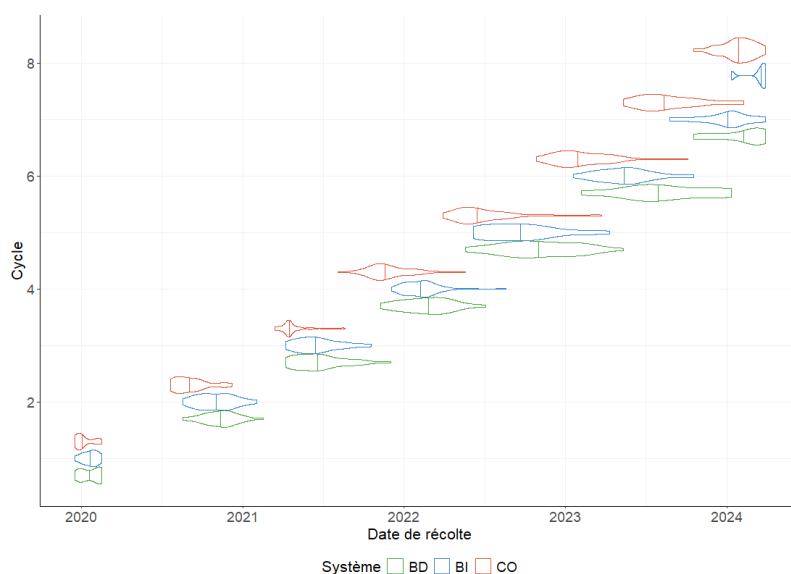


Figure 2 : Espacement et étalement des périodes de récolte en fonction des cycles pour chaque système (CO : Conventionnel ; BI : Bio-Intensif ; BD : Bio-Diversifié). Les barres verticales dans les graphiques représentent la date médiane de récolte.

Dès le premier cycle, les bananiers du système CO ont pris de l'avance : la date médiane de récolte, 26/12/2019, est 31 jours avant celle de BI et BD. L'écart entre CO et les deux systèmes se creuse au deuxième cycle : 63 jours pour BI et 81 jours pour BD. Au troisième cycle, l'écart se réduit de cinq jours pour BI et de 19 jours pour BD. Sur les cycles suivants, l'écart augmente de manière quasiment linéaire pour BD d'environ 39 jours par cycle pour atteindre 217 jours d'écart au 7^{ème} cycle. Pour le système BI, les dates médianes de récolte augmentent également par rapport à celles de CO, pour atteindre 161 jours au 7^{ème} cycle. L'écart est plus faible au huitième cycle car seulement 71 % des bananiers ont été récoltés à la date de fin de cette étude, le 05/04/2024, ainsi l'ensemble de la distribution des dates de récolte ne peut être montrée.

En moyenne sur les cinq années de l'étude, les régimes pesaient 15 % de moins sur le système BI et 28 % de moins sur le système BD, comparativement à ceux du système CO (Figure 3).

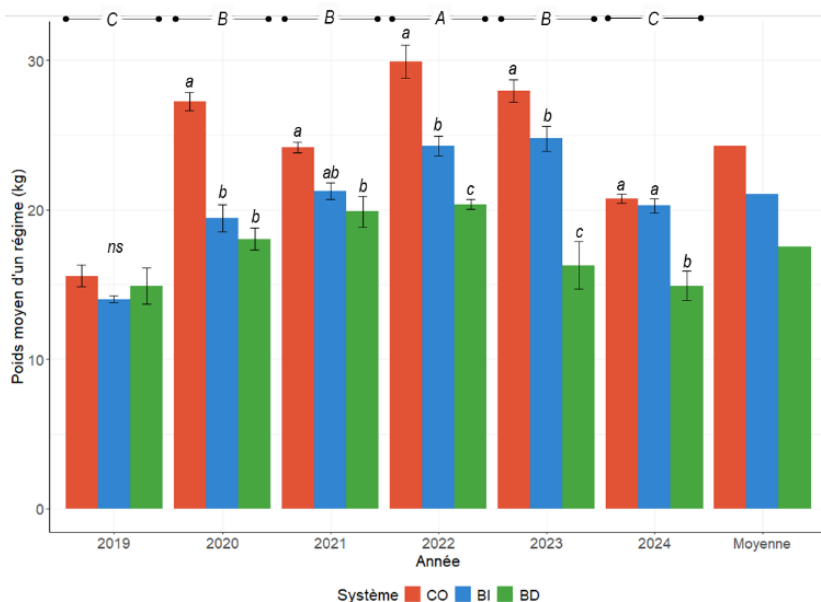


Figure 3 : Poids moyen des régimes de chaque système (CO : Conventionnel ; BI : Bio-Intensif ; BD : Bio-Diversifié) pour chaque année et la moyenne des 5 années. Les premières données de l'année 2019 sont celles de la première récolte le 17/12/2019 et les données de 2024 s'arrêtent au 05/04/2024, soit 5 ans après la plantation. Le poids moyen d'un régime pour un système et une année donnée est calculé sur les trois moyennes de chaque placette de ce système. Les barres d'erreurs représentent les erreurs

standards, les lettres majuscules différentes indiquent des poids de régime significativement différents entre les années et les lettres minuscules différentes indiquent des poids de régime différents entre les systèmes au sein d'une même année, selon le test de Tukey (p-value < 0,05).

En 2020, l'écart entre BI et CO était le plus marqué, avec une réduction de 29 %, soit 7,8 kg de moins. En revanche, l'écart le plus faible a été observé en 2024, avec seulement 0,5 kg de différence, soit 2 %. Pour BD, la différence maximale a été enregistrée en 2023, avec un poids inférieur de 11.6 kg, soit 42 % de moins que CO, tandis que la plus faible réduction a eu lieu en 2019, avec une diminution de 0,7 kg, soit 4 %.

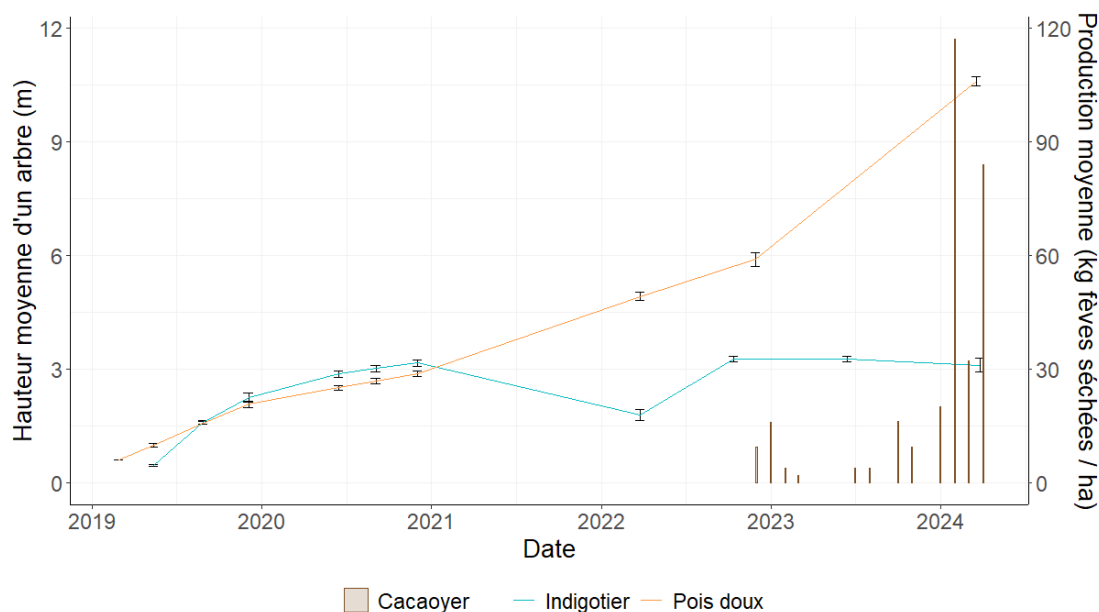


Figure 4 : Hauteur moyenne des arbres de services et production moyenne de fèves séchées des cacaoyers durant l'étude. La hauteur est la moyenne de la hauteur moyenne des arbres de chaque parcelle. La production de cacao est calculée sur l'ensemble des cacaoyers. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Entre février 2019 et mars 2024, les pois doux ont grandi en moyenne de 1,98 mètre par an, jusqu'à dépasser les 10 mètres lors de la dernière mesure. Les indigotiers ont une croissance plus lente, d'environ 0,54 mètre par an les deux premières années puis s'arrêtant, plafonnant à 3,21 mètres (Figure 4).

La première récolte de cacaoyers a eu lieu en décembre 2022 et s'est étendue jusqu'à mars 2023, permettant de récolter l'équivalent de 31,3 kg de fèves séchées par hectare. La production a ensuite repris en juillet 2023, produisant 33,6 kg de fèves séchées par hectare jusqu'en décembre 2023. Cette deuxième vague de production a continué en 2024 avec une récolte de 253,7 kg/ha de fèves. Sur la dernière année de l'étude soit entre avril 2023 et avril 2024, 287,3 kg de fèves sèches / ha ont été récoltés, soit 0,5 kg par plant.

3.2. Gestion des bioagresseurs

L'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) a été calculé de manière annuelle pour chaque système de culture entre 2019 et 2023 (Figure 5). L'usage des produits phytosanitaires a tout d'abord été déterminé par la législation en vigueur et son évolution sur la période. La lutte contre la MRN, qui a représenté l'essentiel des traitements phytosanitaires utilisés sur la durée de l'essai, a été réalisée de manière raisonnée via une stratégie d'avertissement biologique qui a permis d'optimiser la typologie et les fréquences d'usage des produits autorisés. L'usage de traitements herbicides pour la gestion de l'enherbement a également été pris en compte dans le calcul de l'IFT sur le système CO.

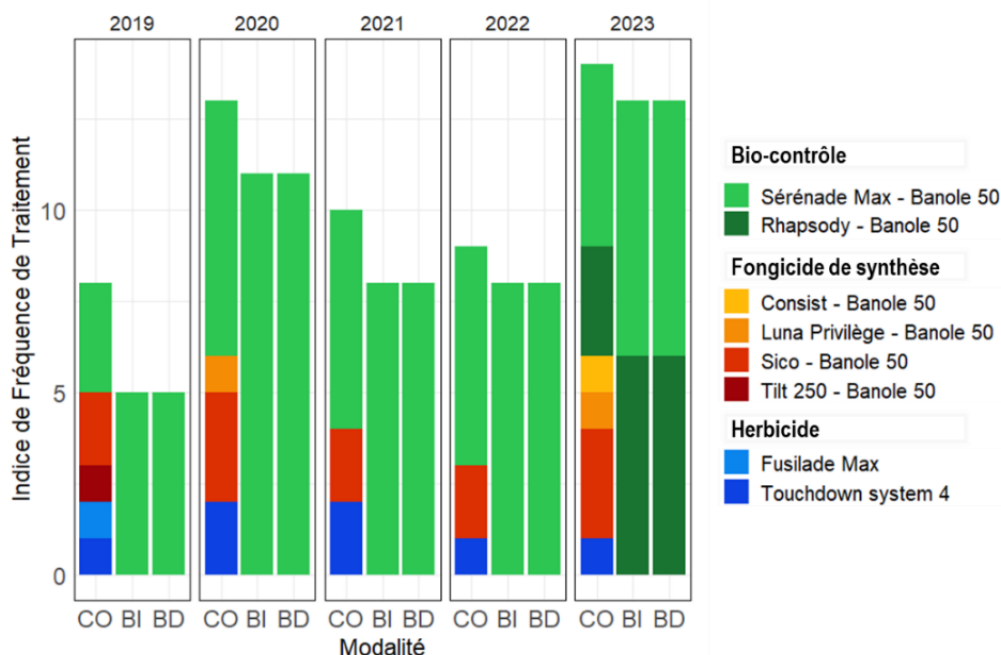


Figure 5 : effectués à partir de la date de plantation des bananiers (avril 2019).

Les IFT des systèmes BI et BD ont été identiques sur la période et ne sont que légèrement inférieurs à celui du système CO (Figure 5). Hors année de plantation, les IFT des systèmes BI et BD ont varié entre 8 applications en 2019 et 2022 et 13 applications en 2023, suivant la dynamique épidémique, la législation en vigueur et la disponibilité des produits. Sur le système CO et hors année de plantation, l'IFT a varié de 9 en 2022 à 14 en 2023. La différence entre ces deux systèmes biologiques et CO s'explique principalement par l'absence d'utilisation d'herbicides sur BI et BD. La relative homogénéité de la dynamique épidémique de la MRN observée sur les trois systèmes de culture a en effet abouti à une synchronisation des applications sur les placettes et à un nombre de traitements quasi-similaire. Cependant, les systèmes BI et BD n'ont fait l'objet que de traitement à base d'agent de biocontrôle et aucun fongicide de synthèse n'a été appliqué sur ces deux systèmes de culture.

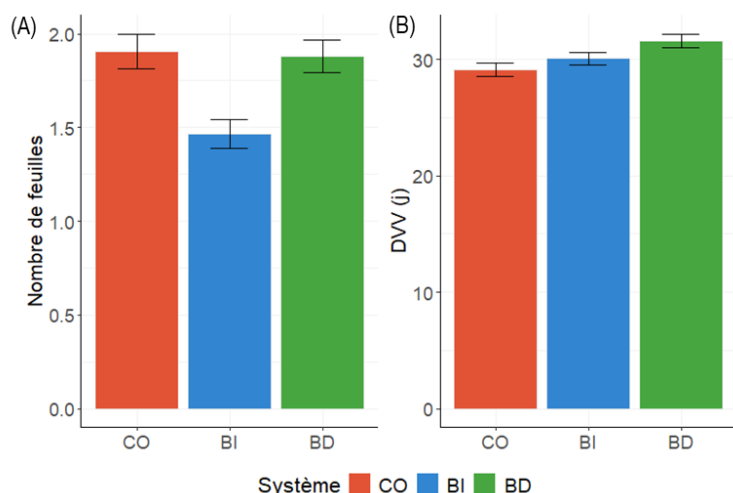


Figure 6 : (A) Moyenne du nombre de feuilles restantes à la récolte et (B) durée de vie verte (DVV) moyenne des bananes. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards, calculées sur l'ensemble des données de chaque système. CO : Conventionnel ; BI : Bio-Intensif ; BD : Bio-Diversifié.

Le nombre de feuille à la récolte, pouvant être fortement impacté par la MRN, est significativement inférieur sur BI par rapport à CO, mais de manière surprenante il est aussi élevé en BD qu'en CO malgré l'absence de traitement fongicide de synthèse dans ce système AB. Ainsi, les bananiers de CO et BD avaient en moyenne 1,9 feuilles à la récolte, contre 1,5 feuilles sur BI. Les tendances sont différentes sur les durées de vie verte (DVV), qui sont en moyenne plus longues de 1,5 jours et 2,5 jours sur BD par rapport à BI et CO respectivement (Figure 6).

3.3 Coûts de production

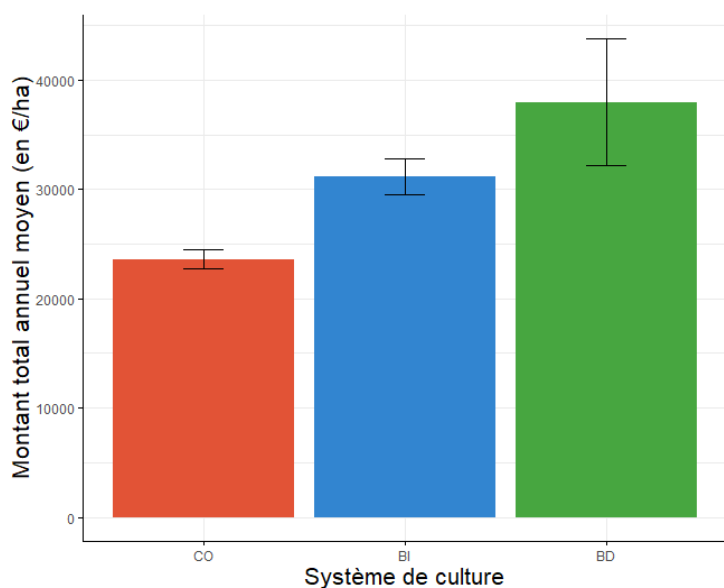


Figure 7 : Coût total de production annuel moyen pour la période 2019-2023 en €/ha. Les barres d'erreur noires représentent les erreurs standards sur la moyenne de chaque système de culture.

A l'échelle du système et sur les cinq premières années du projet englobant environ sept cycles de production de banane, le coût total de production annuel moyen sur BI était 32 % plus cher qu'en CO avec 31 171 €/ha pour BI contre 23 614 €/ha pour CO. Concernant BD, on note une augmentation de 22 % par rapport à BI, avec un coût total moyen annuel de 37 998 €/ha (Figure 7).

Afin d'analyser plus finement les différences de coûts entre les trois systèmes, l'analyse économique a été détaillée pour chaque année et selon six postes de dépenses correspondant aux principales pratiques culturales de la banane (pour les trois systèmes) ainsi qu'aux coûts liés à l'entretien des cacaoyers et des arbres de service (pour le système BD).

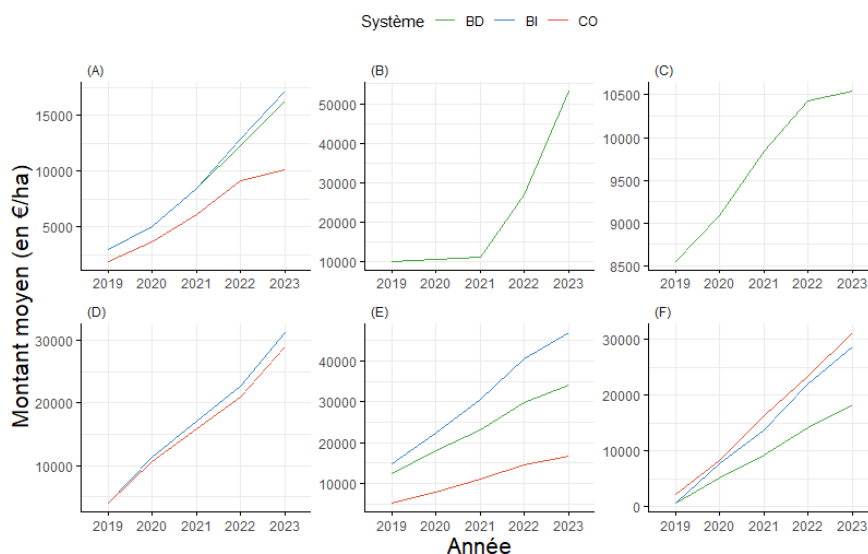


Figure 8 : Cumul des coûts de production annuelle en fonction des trois systèmes de culture et des six principaux postes de dépenses. (A) Enherbement. (B) Arbres de service. (C) Cacaoyers. (D) Cercosporiose noire. (E) Fertilisation. (F) Autres opérations culturales. Les données sont exprimées en €/ha. CO : Conventuel en rouge ; BI : Bio-Intensif en bleu ; BD : Bio-Diversifié en vert.

La gestion des adventices est environ 1,7 fois plus couteuse en cumulé sur les cinq années de production pour les systèmes en agriculture biologique. Ces coûts diminuent à partir de 2022 pour le système CO (Figure 8).

Les plus grosses disparités s'observent pour le pôle fertilisation. En effet, la fertilisation de BI coûte presque trois fois plus cher qu'une fertilisation conventionnelle. La différence entre BD et BI est liée quant à elle uniquement à la densité de plantation, étant donné que le coût de la fertilisation est calculé selon la quantité apportée par pied de bananiers (Figure 8).



Les différences de frais concernant la gestion de la cercosporiose entre les systèmes sont faibles. En effet, il y a autant de passages d'effeuillage et de traitement sur les trois systèmes, seul le prix d'achat du produit utilisé pour les traitements diffère. Sur la figure 8, la courbe concernant BD est cachée par celle de BI car les coûts sont identiques sur la période donnée.

La catégorie « Autres opérations culturales » comprend l'œilletonnage, le soin aux fruits et la récolte. L'œilletonnage est géré de la même manière pour les trois systèmes. Les coûts du soin aux fruits et de la récolte, quant à eux, sont liés directement aux nombres de régime de chaque système, justifiant le fait que les dynamiques des courbes soient similaires aux résultats sur les rendements (Figure 8).

Enfin, les deux pratiques concernant spécifiquement le système BD sont tout d'abord les coûts liés aux arbres de service qui augmentent considérablement dès 2021, puis ceux liés aux cacaoyers, conséquents les premières années et qui tendent à se stabiliser à partir de 2022 (Figure 8).

4. Discussion

Après avoir étudié durant cinq années trois systèmes de production de banane, on observe que selon le nombre de fruits à la floraison, la durée d'un cycle et le poids moyen d'un régime, le système de culture Biologique (BI) est moins performant de 9 %, 13 % et 15 % respectivement par rapport au système de culture Conventionnel (CO). Cette étude montre donc qu'en mettant en œuvre un ensemble de pratiques alternatives aux intrants de synthèse, il est possible de produire de la banane en Agriculture Biologique en conditions tropicales humides, sans avoir une perte de production extrême. Nos résultats montrent que les pertes de rendement induites par une conversion à l'Agriculture Biologique sont dans le même ordre de grandeur pour la banane que pour d'autres cultures (Röös *et al.*, 2018). Cependant, si la gestion des bio-agresseurs a permis la production d'une banane répondant aux exigences de l'exportation (DVV supérieure à 25 jours, Lassoudière, 2007), des points de blocage agronomiques et économiques doivent encore être levés afin de garantir une production optimale. En effet, Seufert *et al.* (2012) montrent que les performances agronomiques réduites d'un système biologique sont majoritairement expliquées par l'usage des fertilisants organiques, la concurrence avec les adventices et la gestion des bio-agresseurs.

Premièrement, les engrais utilisés en agriculture biologique sont organiques et doivent donc être minéralisés par l'activité biologique du sol. Même si des études récentes, menées dans les bananeraies de Martinique et notamment sur le dispositif BANABIO, ont montré que des pratiques agroécologiques tels que l'agroforesterie (El Jaouhari *et al.*, 2022) ou l'arrêt des herbicides (El Jaouhari *et al.*, 2023) favorisent l'abondance de la macrofaune détritvire, cela ne semble pas suffisant pour atteindre un niveau de minéralisation et de mise à disposition des nutriments pour la plante qui soit aussi efficient en AB que peut l'être l'usage d'engrais minéral directement disponible en CO. Ainsi, la nutrition du bananier va être potentiellement plus lente dans les systèmes AB et aussi être plus dépendante des conditions météorologiques, exigeant une gestion optimale de l'irrigation. La nutrition ralentie va ensuite impacter la durée des cycles et le remplissage des fruits donc le poids des régimes (Brasil *et al.*, 2000), comme observé dans cette étude.

L'utilisation d'engrais organiques est également plus coûteuse et explique quasiment à elle seule l'augmentation de 32 % des coûts de production totaux moyens entre le système en agriculture biologique et le système conventionnel. En effet, les engrais organiques ont un coût de production et d'importation plus important qui se répercute sur le prix de vente : ceux utilisés pour notre étude ont été en moyenne 45 % plus chers que les intrants minéraux. L'utilisation de ressources locales est en expansion en Martinique, avec notamment le développement d'entreprises produisant un compost ayant une composition la plus homogène possible. Les producteurs pourraient ainsi associer engrais minéral et organique, afin de profiter des avantages de chaque type d'engrais, permettant une augmentation des rendements (Kanyesigye & Ssemakula, 2023), mais également de réduire les charges de production et l'impact écologique liés à l'importation des produits.



Deuxièmement, la présence d'enherbement engendre une concurrence pour les ressources minérales et hydriques, pouvant être responsable d'une réduction de rendement variable mais très souvent observée dans la littérature (Colbach *et al.*, 2020) et directement corrélée à la biomasse des adventices (Cierjacks *et al.*, 2016). Contrairement à la fauche ou à la tonte, l'usage d'herbicide retarde la repousse des plantes, la biomasse produite sur les placettes biologiques sera donc plus abondante et nécessitera un nombre de passage plus élevé : sur cette étude, seulement deux passages d'herbicide sont réalisés par an sur CO contre en moyenne sept passages de débroussailluse sur BI et BD. Malgré le coût d'achat des herbicides, sur notre étude, le grand nombre de débroussaillages fait que la gestion mécanique a été en moyenne presque deux fois plus chère que la gestion chimique. Ainsi, l'impact négatif agronomique et économique des adventices sera plus important sur BI et BD. Cependant, sur le long terme, la biomasse restituée à chaque coupe permet d'améliorer la fertilité du sol, en augmentant notamment le taux de matière organique, favorisant la biodiversité (El Jaouhari *et al.*, 2023). Sur le long terme, cela permet une meilleure provision de services écosystémiques tels qu'une amélioration du cycle de l'azote et une meilleure rétention de l'eau (Martins *et al.*, 2015). Cela pourra expliquer l'augmentation graduelle du poids des régimes sur BI au fur et à mesure des années. Continuer cet essai permettra d'observer les évolutions sur le long terme et observer potentiellement une réduction de l'écart entre CO et BI.

Afin de réduire l'impact de l'enherbement, des plantes de services légumineuses avait été implantées à la plantation. Cependant, celles-ci n'ont pas réussi à se développer suffisamment par rapport aux adventices. Depuis, de nouvelles études ont été menées, pour identifier des plantes de services étant davantage adaptées, notamment à l'ombrage et pourraient donc réduire ces impacts (Achard *et al.*, 2018). De plus, le désherbage mécanique à la débroussailluse à dos est particulièrement pénible, chronophage et nécessaire en main d'œuvre. Le développement de nouveaux outils et techniques est en cours, avec l'arrivée de nouveaux matériels mécanisés et autonomes mais également l'utilisation d'animaux de service comme le mouton (Andrieu *et al.*, 2023). Ceux-ci pourraient permettre de réduire l'impact sur le rendement mais également sur les coûts de production.

Sur le système agroforestier BD, les performances agronomiques sont inférieures avec une réduction du nombre de fruits de 19 %, des cycles 17 % plus longs et des régimes 28 % plus légers par rapport au système CO. Cette réduction pourrait s'expliquer par la présence des arbres, qui engendrent une compétition importante pour les ressources minérales, hydriques et pour la lumière.

Lors de la conception du système BD, l'objectif était de réduire la concurrence pour les ressources minérales en choisissant des espèces d'arbres légumineuses : l'indigotier et le pois doux. L'objectif était également de diversifier les apports d'azote en restituant la biomasse issue des tailles, qui sont composées à 80 % pour le pois doux et 75 % pour l'indigotier d'azote d'origine atmosphérique (Coulis *et al.*, 2022). Ainsi, dès 2020, 12 % de l'azote des feuilles de bananier était d'origine atmosphérique et on peut s'attendre à des taux encore plus importants les années suivantes (Coulis *et al.*, 2022). Cependant, les pois doux se sont développés à grande vitesse, et ont rapidement fermé la canopée. Dès le deuxième cycle, les récoltes deviennent plus tardives par rapport à BI. Malgré un abattage onéreux de 60 % des arbres en août 2023, l'impact sur le développement est déjà marqué : on observe une chute brutale du poids des régimes. Les arbres ont été positionnés au milieu des rangs de plantation mais un design différent, avec des arbres en bordure de parcelle ou remplaçant des rangs de plantation, permettant de garder une partie de la canopée ouverte pourrait faciliter la gestion des tailles, réduire l'impact sur la production et les coûts d'entretien tout en conservant les avantages de fixation et de restitution d'azote.

A ces aspects nutritifs s'ajoutent également la régulation des bioagresseurs, notamment de la cercosporiose noire. Sur cet essai, situé dans une zone assez humide favorable au développement de la maladie, la pression épidémique a été particulièrement élevée, aboutissant à un nombre de feuilles à la récolte assez bas en moyenne sur les trois systèmes de culture. Celui-ci a toutefois été plus important sur le système BD que sur le système BI, malgré des traitements identiques, mais aussi équivalent entre BD et le système CO, sur lequel ont pourtant été pratiqués des traitements à bases fongicides de synthèse curatifs et dont la vigueur des bananiers a été plus importante (*i.e.* durée du cycle plus faible). Cette



différence pourrait s'expliquer par les effets régulateurs liés à la présence d'arbre sur la propagation des spores de *Pseudocercospora fijiensis*, le champignon responsable de la maladie, via des effets barrières ou de modification du régime des vents à proximité (Poeydebat *et al.*, 2018, Delatouche *et al.*, 2023), mais aussi par leur impact sur le microclimat et le microbiote phyllosphériques, suspectés d'être à l'origine de la diminution de la densité des lésions symptomatiques et de l'augmentation de la durée d'incubation de la maladie observées lors d'une étude antérieure (Poeydebat *et al.*, 2018). Le système BD a également permis d'obtenir, pour des récoltes effectuées à âges physiologiques identiques, des DVV supérieures à celles obtenues en BI, elles-mêmes supérieures à celles observées pour les fruits issus du système CO. Ces deux systèmes biologiques, en particulier le système arboré, pourraient atténuer partiellement l'impact de la maladie et de la défoliation qu'elle provoque sur le risque de mûrs d'arrivage, par rapport au système de culture conventionnel (Castelan *et al.*, 2012 ; Chillet *et al.*, 2009). Il demeure cependant difficile de lier spécifiquement la DVV plus longue observée sur BD et BI à une moindre pression de la maladie sur ces systèmes. D'autres paramètres pré-récolte, tels qu'un excès d'azote et des stress hydriques, peuvent également fortement influencer la DVV (Brat *et al.*, 2020).

L'objectif du système agroforestier BD était également de diversifier la production en incluant des cacaoyers, culture ayant un coût d'installation conséquent mais un coût d'entretien faible. Cela a permis de fructueuses récoltes, certes inférieures aux moyennes de rendement en monoculture (0,77 kg/plant) mais supérieures à celles généralement mesurées en agroforesterie (0,4 kg/plant) (Mattalia *et al.*, 2022). Le deuxième pic de production n'étant pas terminé à la fin de cette étude, des rendements plus importants sont attendus, ouvrant la voie à la diversification de production en bananeraie.

Les résultats encourageants de cette étude sont néanmoins à nuancer. En effet, ceux-ci sont intimement liés aux systèmes mais également aux avantages et contraintes de notre parcelle expérimentale. Un ouvrier agricole dédiait 80 % de son temps de travail à l'entretien de la parcelle, permettant un suivi précis et régulier des opérations culturales, optimisant les productions des systèmes et réduisant l'écart entre le système biologique et conventionnel (Seufert *et al.*, 2012). De plus, les étapes d'emballage pour la banane et de transformation pour le cacao n'ont pas été réalisées mais peuvent représenter des besoins en main d'œuvre conséquents (Mazardin & Saj, 2023). La main d'œuvre agricole en Martinique étant en baisse (-26 % entre 2010 et 2020, DAAF, 2024), le besoin en main d'œuvre peut ainsi représenter un frein à la transition des systèmes conventionnel vers des systèmes agroécologique plus nécessitent en personnel.

Concernant l'analyse économique, celle-ci étant basée sur les opérations réelles, des variations annuelles selon le contexte peuvent être observées : par exemple, certains herbicides ont été interdits ponctuellement : il faut donc utiliser d'autres produits qui peuvent être plus chers ou faire un débroussaillage, qui augmente les coûts. De plus, la parcelle ayant une surface réduite, il n'y a pas d'économie d'échelle qu'on pourrait retrouver chez les producteurs. Les indicateurs présentés dans cette étude n'ont donc pas vocation à établir un coût global de production à l'échelle d'un territoire mais bien d'illustrer les dépenses réelles effectués sur nos systèmes, avec des stratégies spécifiques.

Enfin, les filières de valorisation n'ont également pas été étudiées dans cet essai. Certains régimes du système BD n'atteignaient pas, depuis 2023, les calibres nécessaires pour être exportés. De plus, à la mise en carton pour l'exportation, les bananes sont également traitées avec un fongicide, qui n'est pas autorisé en Agriculture Biologique. Dans ces deux cas, la valorisation en local serait donc à favoriser.

5. Conclusion

Le dispositif expérimental BANABIO se distingue par son caractère innovant et sa longévité. Les cinq années de suivi du système en agriculture biologique ont démontré que, malgré un rendement moindre, il est possible de produire des bananes sans recourir aux produits phytosanitaires de synthèse, même sous un climat tropical humide. Le système biologique en monoculture (BI) n'a pas permis une production aussi importante que celle du système conventionnel mais l'amélioration des propriétés physiques et



biologiques du sol pourrait permettre de réduire l'écart de rendement. L'entretien d'un système biologique est également plus coûteux et demande à être optimisée pour améliorer la viabilité économique.

Le système agroforestier, bien que moins performant en termes de production de bananes, a démontré une gestion plus efficace du principal bioagresseur, la cercosporiose noire, et permet la diversification grâce à la production de cacao. Cette diversification offre des perspectives intéressantes pour une valorisation locale, mais elle présente aussi des défis, notamment la concurrence des arbres pour les ressources et les coûts d'entretien accrus. Des ajustements dans la disposition et la gestion des arbres pourraient renforcer l'efficacité de ce modèle.

La poursuite de ce dispositif permettra un suivi approfondi et l'intégration de nouveaux indicateurs sur le long terme, afin d'optimiser les systèmes de culture et de favoriser une transition agroécologique viable des bananeraies en Martinique et, plus largement, dans les Antilles.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Mathieu Coulis <https://orcid.org/0000-0001-5895-8519>

Elodie Dorey <https://orcid.org/0009-0000-6261-6589>

Simon Gibert <https://orcid.org/0000-0001-9461-3585>

Fabrice Lamy <https://orcid.org/0009-0009-3530-434X>

Claire-Marie Rohé <https://orcid.org/0009-0003-5389-1097>

Contributions des auteurs

Mathieu Coulis : Conceptualisation, Recherche, Méthodologie, Administration du projet, Supervision, Validation, Rédaction - version originelle, Rédaction - Révision et correction

Elodie Dorey : Validation, Rédaction - Révision et correction

Inès Féron : Conceptualisation, Analyse formelle, Recherche, Méthodologie, Administration du projet, Validation, Visualisation, Rédaction - version originelle, Rédaction - Révision et correction

Simon Gibert : Conceptualisation, Recherche, Méthodologie, Validation, Rédaction - version originelle, Rédaction - Révision et correction

Fabrice Lamy : Méthodologie, Validation, Rédaction - Révision et correction

Claire-Marie Rohé : Conceptualisation, Recherche, Méthodologie, Administration du projet, Supervision, Validation, Visualisation, Rédaction - version originelle, Rédaction - Révision et correction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.



Remerciements

Nous remercions chaleureusement Raphaël Achard, Maurice Alier, Cédric Bellance, Olivier Birba, Géraldine Boon, Karine Cartau, Marie-Odette Daribo, Anaïs Falk, Laurent Gervais, Claire Guillermet, Eliane Marville, Christiane Mauriol, Loïc Monsoreau, Loïc Normand, George Ornem, Alice Prochasson, Elisabeth Rosalie, Jérôme Sainte-Rose, Marie Sauvadet, Nelly Telle, Lucas Tsoukas, pour leur participation au bon déroulement de ce projet.

Déclaration de soutien financier

Le projet BANABIO a bénéficié de financements dans le cadre du plan Ecophyto II DEPHY EXPE II.

Références bibliographiques :

- Achard R., Tixier P., Dorel M., Roger Estrade J., 2018. Intercropping of grass cover crops in banana plantations : Impacts on banana growth and yield. *Tropical Agriculture and Development*. <https://doi.org/10.11248/jsta.62.1>
- Andrieu N., Dorey E., Lakhia S., Meynard P., Hatil E., Normand L., Gourdine J.-L., Bambou J.-C., 2023. Introducing sheep for agroecological weed management on banana plantations in Guadeloupe : A co-design process with farmers. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103783>
- Brasil E. C., Oeiras A. H. L., Menezes A. J. E. A. D., Veloso C. A. C., 2000. Desenvolvimento e produção de frutos de bananeira em resposta à adubação nitrogenada e potássica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(12), 2407-2414. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000001200011>
- Brat, P., Bugaud, C., Guillermet, C., Salmon, F., 2020. Review of banana green life throughout the food chain: From auto-catalytic induction to the optimisation of shipping and storage conditions. *Scientia Horticulturae* 262, 109054. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109054>
- Cantrelle N., Dawson C., Loeillet D., Lescot T., Risède J.-M., 2020. La banane aux Antilles françaises. *Fruitrop*, 272, 16-27.
- Carr M. K. V., 2009. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa* spp.). *Experimental Agriculture*, 45(3), 333-371. <https://doi.org/10.1017/S001447970900787X>
- Castelan, F.P., Saraiva, L.A., Lange, F., De Lapeyre De Bellaire, L., Cordenunsi, B.R., Chillet, M., 2012. Effects of Black Leaf Streak Disease and Sigatoka Disease on fruit quality and maturation process of bananas produced in the subtropical conditions of southern Brazil. *Crop Protection* 35, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.08.002>
- Chandler S., 1995. The nutritional value of bananas. In *Bananas and plantains*, 468-480. Chapman & Hall.
- Chillet M., De Lapeyre De Bellaire L. de, Hubert O., Mbégué-A-Mbégué D., 2008. Measurement of banana green life. *Fruits*, 63(2), 125-127. <https://doi.org/10.1051/fruits:2007055>
- Chillet, M., Abadie, C., Hubert, O., Chilin-Charles, Y., De Lapeyre De Bellaire, L., 2009. Sigatoka disease reduces the greenlife of bananas. *Crop Protection* 28, 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.08.008>
- Cierjacks A., Pommeranz M., Schulz K., Almeida-Cortez J., 2016. Is crop yield related to weed species diversity and biomass in coconut and banana fields of northeastern Brazil? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.006>
- CIRAD, 2016. Catalogue des innovations du CIRAD aux Antilles—Guyane—Filière Banane.



- Colbach N., Petit S., Chauvel B., Lechenet, M., 2020. Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : Analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. <https://doi.org/10.15454/bpst-th82>
- Coulis M., Sauvadet M., Falk A., Prochasson A., Tsoukas L., Gervais L., Normand L., Rosalie E., Achard R., Monsoreau L., Telle N., Mauriol C., Birba O., Ornem G., Alier M., Marville E., Daribo M. O., Sainte-Rose J., Dural D., ... Guillermet C., 2023. Multidisciplinary assessment of two organic banana production systems in Martinique. *Acta Horticulturae*, 1367, 35-46. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1367.4>
- Coulis M., Sauvadet M., Prochasson A., Julan C., Vincent B., Bâ A., Galiana A., 2022. Impact de l'introduction de légumineuses ligneuses sur l'apport d'azote fixé d'origine symbiotique au sein des systèmes bananiers. Fixation biologique de l'azote et biofertilisation : des outils agro-écologiques pour le développement durable et la sécurité alimentaire dans le contexte du changement climatique. Congrès de l'Association Africaine pour la Fixation Biologique de l'Azote, Dakar, Sénégal. <https://agritrop.cirad.fr/606228/>
- DAAF, 2024. Fiche territoriale détaillée RA 2020 « MARTINIQUE ».
- Delaplace A., 2023. Étude multi-échelle de la dynamique de population et du niveau d'infestation du charançon noir du bananier en fonction du contexte paysager en Martinique. Thèse de Doctorat.
- Delatouche L., Tixier P., Sainte-Rose J., Daribo M., De Lapeyre De Bellaire L., 2023. How do hedgerow characteristics alter the dispersal of *Pseudocercospora fijiensis* propagules? *Pest Management Science*, ps.7876. <https://doi.org/10.1002/ps.7876>
- De Lapeyre de Bellaire L., Fouré E., Abadie C., Carlier J., 2010. Black Leaf Streak Disease is challenging the banana industry. *Fruits* 65, 327-342.
- El Jaouhari M., Damour G., Mauriol C., Coulis M., 2022. Effets des pratiques agricoles sur les macroarthropodes du sol dans les bananeraies de Martinique. *Etude et Gestion des Sols*. <https://agritrop.cirad.fr/600511/>
- El Jaouhari M., Damour G., Tixier P., Coulis M., 2023. Glyphosate reduces the biodiversity of soil macrofauna and benefits exotic over native species in a tropical agroecosystem. *Basic and Applied Ecology*, 73, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2023.10.001>
- Fouré E., Garry J., 2008. A biological forecasting system to control Black Leaf Streak disease of bananas and plantains. *Fruits*, 63(5), 311-317. <https://doi.org/10.1051/fruits:2008029>
- Fruitrop, 2016. Fiche 1 : La banane en chiffres.
- Garry J., Meyer J.-P., 1975. The search for a law governing the effect of temperature on banana fruit growth. *Fruits*, 30(6), 375-392.
- Garry J., De Lapeyre De Bellaire L., Mourichon X., 2008. A biological forecasting system to control Sigatoka disease of bananas and plantains, *Fruits* 63, 6, 381-387. <https://doi.org/10.1051/fruits:2008038>
- Gutiñas M. E., Leirós M. C., Trasar-Cepeda C., Gil-Sotres F., 2012. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization : A laboratory study. *European Journal of Soil Biology*, 48, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.07.015>
- Kanyesigye J., Ssemakula E., 2023. Assessment of the effects of farmyard manure and npk fertilizer application on banana yields in Shuuku Town Council, Sheema district, Western Uganda. *Journal of Development, Education & Technology*, 1(1).
- Lenth RV, 2023. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means



- Martins B. H., Araujo-Junior C. F., Miyazawa M., Vieira K. M., Milori D. M. B. P., 2015. Soil organic matter quality and weed diversity in coffee plantation area submitted to weed control and cover crops management. *Soil and Tillage Research*, 153, 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.005>
- Mattalia G., Wezel A., Costet P., Jagoret P., Dehevels O., Migliorini P., David C., 2022. Contribution of cacao agroforestry versus mono-cropping systems for enhanced sustainability. A review with a focus on yield. *Agroforestry Systems*, 96(7), 1077-1089. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00765-4>
- Mazardin A., Saj S., 2023. WP4 : Systèmes Agroforestiers. Étude technico-économique prospective des systèmes café/cacao. Rapport final. CIRAD. <https://agritrop.cirad.fr/604268/>
- Musongora M., Karanja N., Kimenju W., Kamau S., 2023. Spatio-temporal change of selected soil physico-chemical properties in grevillea-banana agroforestry systems. *Heliyon*, 9(5), e16121. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16121>
- Poeydebat C., Carval D., Tixier P., Daribo M.-O., De Lapeyre De Bellaire L., 2018. Ecological Regulation of Black Leaf Streak Disease Driven by Plant Richness in Banana Agroecosystems. *Phytopathology* 108, 1184–1195.
- Risède J.-M., Achard R., Brat P., Chabrier C., Damour G., Guillermet C., De Lapeyre de Bellaire L., Loeillet D., Lakhia S., Meynard C., Tixier P., Tran Quoc H., Salmon F., Côte F.-X., Dorel M., 2019. The agroecological transition of Cavendish banana cropping systems in the French West Indies. In F.-X. Côte, E. Poirier-Magona, S. Perret, P. Roudier, B. Rapidel, M.-C. Thirion (Éds.), *The agricultural transition of agricultural systems in the Global South*, 107-126. Editions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3057-0>
- Röös E., Mie A., Wivstad M., Salomon E., Johansson B., Gunnarsson S., Wallenbeck A., Hoffmann R., Nilsson U., Sundberg C., Watson C. A., 2018. Risks and opportunities of increasing yields in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0489-3>
- Seufert V., Ramankutty N., Foley J. A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.