



HAL
open science

Intégration de critères agronomiques dans la modélisation de la viabilité des agrosystèmes insulaires tropicaux

Julie Caquelard

► **To cite this version:**

Julie Caquelard. Intégration de critères agronomiques dans la modélisation de la viabilité des agrosystèmes insulaires tropicaux. Sciences agricoles. 2018. hal-02787567

HAL Id: hal-02787567

<https://hal.inrae.fr/hal-02787567>

Submitted on 2 Jun 2021

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



Les partenaires et financeurs du projet AgroEcoDiv :



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome

Option : Production Végétale Durable

Intégration de critères agronomiques dans la
modélisation de la viabilité des agrosystèmes
insulaires tropicaux



Par Julie Caquelard

Année de soutenance : 2018

Organisme d'accueil : INRA Antilles Guyane

Intégration de critères agronomiques dans la modélisation de la viabilité des agrosystèmes insulaires tropicaux

Résumé

Les territoires insulaires tropicaux sont fortement touchés par des changements globaux. Les changements climatiques en font partie. Les **Antilles françaises** cristallisent la diversité des problématiques liées à la **viabilité** des **agro systèmes** si importants dans le contexte de changements globaux. Le **modèle GAIA SCOPE**, issu d'une collaboration pluridisciplinaire et pluri partenaire entre l'INRA, le CIRAD et l'Université Paris dauphine, a vu le jour en 2013(OZIER-LAFONTAINE 2012). Ce modèle basé sur la **théorie de la viabilité** (Aubin 2009) permet d'identifier des **trajectoires d'exploitations** agricoles viables. Elles sont viables au sens d'une amélioration ou tout du moins d'un maintien de la **qualité de sol** exprimé par l'indicateur **BISQ** et par une amélioration ou un maintien de l'état économique de l'exploitation exprimé par le **revenu cumulé**. Les trajectoires d'exploitations sont exprimées graphiquement par les **successions de cultures** mises en place et les **pratiques de cultures** qui y sont associées sur une longue période de temps, 40 ans.

L'absence de règles de décision agronomique dans le choix des successions de culture, provoque certaines incohérences dans les successions culturales proposées par le modèle. L'objectif de ce travail est d'identifier des **règles de décision** permettant d'encadrer le choix des successions culturales. La problématique est la suivante : « Comment rendre le modèle GAIA SCOPE agronomiquement cohérent et représentatif de l'agriculture guadeloupéenne ? ».

A partir de recherches bibliographiques approfondies et de dires d'experts, nous avons identifié 5 thématiques sur lesquelles sont portées les règles de décisions permettant d'enrichir le modèle sur le plan agronomique :

- L'appartenance des cultures qui se suivent dans la succession à des **familles botaniques** différentes.
- Eviter la formation de foyers de pathogènes en limitant le nombre de **maladies et ravageurs** partagés par les cultures qui se suivent dans une succession de culture.
- Eviter l'épuisement des **ressources minérales** du sol en faisant se succéder des spéculations prélevant les éléments minéraux : Azote, Phosphate et Potassium dans des proportions différentes.
- Optimiser les successions de cultures pour que l'effet des racines sur la **décompaction du sol** soit positif.
- Respecter la **saisonnalité des cultures** pour leur mise en culture.

L'efficacité de ces règles de décision est évaluée sur 6 exemples de trajectoires du modèle, les incohérences sont mises en évidence et de nouvelles trajectoires sont proposées. Les nouvelles trajectoires agronomiquement performantes sur les thématiques proposées dans les règles de décisions ne permettent pas systématiquement l'amélioration des performances économiques à travers le revenu cumulé, ni la qualité de sol évaluée par l'indicateur BISQ. Les paramètres de viabilité pris en compte par le modèle ne prennent pas en compte les répercussions des améliorations agronomiques proposées par les règles de décision, une extinction des paramètres d'évaluation des trajectoires pourrait être incorporée pour affiner le modèle.

Mots clefs :

Antilles Françaises - Viabilité - Agro systèmes - Trajectoire d'exploitation - Successions de cultures - Pratiques de culture - Règles de décisions.

Integrating agronomic variables within tropical island agrosystems sustainability modelling

Abstract

Tropical island territories are strongly affected by global climate change. **The French West Indies** depicts the diversity of issues related to **viability** of **agro-systems**, which are becoming even more important as the climate is changing. The **GAIA SCOPE** model was born from a multi-disciplinary and multi-partners collaboration between INRA, CIRAD and Paris Dauphine University. This model based on the **Theory of Viability** (Aubin 2009) enables to identify viable **farming system**, which must improve or at least maintain **soil quality** (defined by the **BISQ** indicator) and financial situation of the farm (defined by the **cumulative income**). Farming systems are defined by **crop rotations** and associated **cultural practices** over 40 years, considered as a long period of time.

The lack of agronomic **decision rules** for defining crop rotation is making the model inconsistent when picking a rotation. This study aims at identifying decision rules for a better control of the crop rotation definition by the model. Therefore the main question is : "How to make the GAIA SCOPE model agronomically consistent and representative of Guadeloupian farming systems?".

Based on literature and interviews with INRA agents, we have identified 5 types of decision rules making the model more efficient on the agronomic aspect, which are the following:

- Selecting successive crops that belong to different **botanical families**.
- Limiting pathogen outbreak development by limiting the number of **diseases and pests** common to successive crops.
- Reducing **mineral stock** depletion by selecting crops which do not require high amounts of same minerals (Nitrogen, Phosphate, Potassium and Organic matter)
- Optimizing crops successions enabling high root **soil decompaction**.
- Respecting crop **seasonality**.

The efficiency of these decision rules is assessed using 6 examples of model trajectories, where inconsistencies are highlighted and new trajectories are proposed. The new agronomically efficient trajectories on the themes proposed in the decision rules do not systematically allow the improvement of the financial performances, nor the soil quality. The viability parameters considered by the model do not take into account the impact of the agronomic improvements proposed by the decision rules, an extinction of the trajectory evaluation parameters could be integrated to refine the model.

Keywords :

French West Indies - Viability - Agro systems - Farming trajectory - Crop succession - Cultural practices - Decision rules.

Remerciements

Je tiens à remercier avec beaucoup de gratitude et de sincérité ma tutrice Aurélie Metay. Vous avez toujours été présente, que ce soit sur le plan méthodologique, avec vos conseils avisés qui m'ont permis de faire progresser mon travail, sur le plan logistique, pour organiser la soutenance et surtout sur le plan psychologique, Je vous suis très reconnaissante de m'avoir fait croire en moi et de m'avoir toujours soutenue. Sans votre aide, ce mémoire n'aurait pas été possible.

Merci à toute l'équipe de l'unité PEYI pour la bonne ambiance communicative qu'ils ont partagée avec nous. David merci pour tes conseils et ta présence, Thomas merci de m'avoir motivée dans les moments difficiles. Un gros merci aux nombreux stagiaires et VIE de l'unité, Emilie, Marie, Teresa, Jessica, Gael, Antonia, Colombine, Aurélie, et Stéphane. Et merci à ma super Coloc Romane.

Je remercie aussi mes maîtres de stage pour m'avoir prise en stage.

Merci aux volleyeurs de l'ADAS de l'INRA : Éric, Guilhem, Clément, Gael, Emilie, Laurent, Fifi, Patrick et Laurent, je me souviendrai de bonnes parties. Merci de m'avoir appris à jouer.

Merci aux amies bambousard pour les week-end et moments partagés pendant ce stage : Jessica bien sûr, Mathieu, Solène, Tiphaine Manon et tous ceux que je ne cite pas.

Je remercie ma famille de cœur et en particulier Calypso, Ophélie, Laure, Sarah qui se sont inquiétées pour moi et qui ont entrepris de me soutenir à distance, ce qui n'est pas facile, mais elles l'ont fait avec brio !

Je remercie enfin ceux qui ont toujours été là dès le début et qui m'ont fait confiance pour tous les choix que j'ai pu faire et ont toujours cru en moi. Merci d'avoir relu et corrigé mes travaux. Je leur en suis très reconnaissante. Je remercie mes parents.



Table des matières

Sommaire

Résumé.....	3
Mots clefs :	3
Abstract	4
Keywords :	Erreur ! Signet non défini.
Remerciements	5
Table des matières	6
Table des figures	8
Table des tableaux	9
Table des Annexes.....	10
Sigles et acronymes	11
1) Introduction.....	12
2) Contexte et état de l’art	13
2.1. L'agriculture des Antilles Françaises.....	13
2.1.1. Les Antilles Françaises territoire d’étude privilégié pour étudier la viabilité en agriculture.	13
2.1.2. Enjeux agronomiques des systèmes insulaires : notion de succession culturelle et présentation des cultures étudiées.	15
2.1.3. Trajectoire d’exploitation : les successions culturelles au cœur du sujet.	15
2.1.4. Enjeux économiques des systèmes insulaires.....	17
2.1.5. Sensibilité des systèmes insulaires au changement climatique	18
2.2. Caractérisation de la théorie de la viabilité.	19
2.2.1. Définition et cadre théorique	19
2.2.2. Méthodes d'évaluation de la viabilité.	19
2.2.3. Le modèle GAIA SCOPE et la notion de viabilité.....	20
2.2.4. Analyse conceptuelle du modèle GAIA SCOPE.....	25
2.2.5. Analyse agronomique du modèle Gaia Scope.....	27
2.3 Problématique du stage et démarche adoptée.....	28
3) Matériel et méthodes	28
3.1. Matériel	28
3.2. Méthode.....	29
3.2.1 Méthode générale	29
3.2.2 Méthode de réalisation de chacun des critères de choix de succession culturelle	31
3.2.3 Démarche d’évaluation des règles de décisions	36
4) Résultats	37

4.1. Critère de choix n°1 : Compatibilité des familles botaniques auxquelles appartiennent les cultures dans les successions culturales	37
4.2. Critère de choix n°2 : Maladies et ravageurs communs aux couples de spéculations.....	38
4.3. Critère de choix n°3 : les propriétés chimiques du sol, les impacts et besoins des cultures en éléments minéraux.....	39
4.3.1. Les résidus de cultures et la matière organique	40
4.4. Critère de choix n°4 : Impact de la prospection racinaire des cultures sur les propriétés physiques du sol : état de compaction.	41
4.5. Critère de choix n° 5 : la saisonnalité des cultures	42
4.6 : Synthèse Arbre de décision final :	42
4.6 Evaluation des règles de décision agronomique proposée pour améliorer le modèle.	43
4.6.1 Première étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export.....	43
4.6.2 Seconde étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export et avec changement de culture imposé.	44
4.6.3 Troisième étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export et en minimisant les couts de mise en place de chaque nouvelle culture.	45
4.6.4 Quatrième étude de cas : Modèle destiné au marché local avec un capital initial plus faible.	46
4.6.5 Cinquième étude de cas : Modèle destiné au marché local sur un laps de temps plus court.	48
4.6.6 Sixième étude de cas : Modèle destiné au marché local sur un laps de temps plus court et des ressources financières élevées.....	49
5) Discussion	51
5.1. Discussion sur le matériel et la méthode utilisée.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1 Discussion du modèle.....	51
5.2. Discussion sur les résultats.....	53
5.3. Perspectives	54
6) Conclusion	55
Bibliographie	55
Annexes.....	62
Résumé.....	121
Mots clefs :	121
Abstract	120
Keywords :	Erreur ! Signet non défini.

Table des figures

Figure 1: Zonage agroécologique de l'archipel de Guadeloupe. Source : LUCIEN BRUN Maël 2014....	14
Figure 2: Assolement du territoire guadeloupéen Agreste – recensement agricole 2010.	14
Figure 3 : schématisation des effets précédents d'une culture sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Lors de ce travail nous nous intéresserons particulièrement aux effets des cultures, représentés en vert.	16
Figure 4 :Analyse structurelle du modèle GAIA SCOPE.....	22
Figure 5 : schéma conceptuel du modèle GAIA SCOPE.....	26
Figure 6 : Matériel utilisé en fonction des étapes de travail.....	29
Figure 7 : Schéma de l'ensemble des règles de décision agronomique prise par l'agriculteur pour raisonner les successions de cultures du modèle GAIA SCOPE.....	30
Figure 8 : Les étapes de la méthode pour le comptage des MR par couple de spéculation.....	32
Figure 9 : Arbre de décision pour le choix du suivant à la fin d'un cycle de production.	38
Figure 10 : Arbre de décision relatif aux maladies et ravageurs des cultures.....	39
Figure 11 : Critère de choix relatif aux exigences et effet des spéculations sur l'état de compaction du sol.	42
Figure 12 : Arbre de décision final intégrant les différentes règles de décision	43
Figure 13 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°2.....	44
Figure 14 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°2.	45
Figure 15 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°3.....	46
Figure 16 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°3.	46
Figure 17 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°4.....	47
Figure 18 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°4.	48
Figure 19 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°5.....	49
Figure 20 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°5.	49
Figure 21 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°6.....	50
Figure 22 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°6.	50
Figure 23 : Cycle de culture de la canne à sucre en Guadeloupe.....	53

Table des tableaux

Tableau 1 : Etat des lieux de la diversité des domaines dans lesquels la théorie de la viabilité est utilisé.

Tableau 2 : Les familles botaniques auxquelles appartiennent les spéculations du modèle GAIA. SCOPE.

Tableau 3 : Nombre des maladies et ravageurs partagé par les couples de spéculations présentés en lignes et en colonnes.

Tableau 4 : Hiérarchisation des couples de spéculation en fonction de leurs aptitudes à être mis en succession en fonction de la proportion de leur besoin en Azote, Phosphate et Potassium.

Tableau 5 : Restitution et besoin en matières organiques des cultures.

Tableau 6 : Classement des spéculations en fonction de leurs impacts sur le sol.

Tableau 7 : Saisonnalité des cultures

Table des Annexes

Annexe 1 : Organigramme du projet AgroEcoDiv.....	62
Annexe 2 : L'histoire de l'agriculture en Guadeloupe.	63
Annexe 3 : Contexte pédoclimatique de la Guadeloupe.....	66
Annexe 4 : Carte pédologique simplifiée de la Guadeloupe.	68
Annexe 5 : Diagramme ombrothermique - Station du Raizet, Guadeloupe	69
Annexe 6 : Carte pluviométrique de la Guadeloupe, normales annuelles entre 1981 et 2010 en mm. .	70
Annexe 7 : Structure des exploitation agricole Guadeloupéenne	71
Annexe 8 : Fiche techniques des caractéristiques agronomique de chaque spéculation.	72
Annexe 9 : étude de cas de l'utilisation de la théorie de la viabilité	82
Annexe 10 : Durée du cycle de production par spéculation en fonction de la pratique adopté.....	84
Annexe 11 : Méthode de calcul du BISQ dans le modèle GAIA SCOPE.....	85
Annexe 12 : Source d'informations concernant les maladies et ravageurs de chaque spéculation du modèle	86
Annexe 13 : Illustration des calculs pour le critère de choix relatif aux propriétés chimiques du sol, les impacts et besoins des cultures en éléments minéraux.....	88
Annexe 14 : Référence bibliographique relative aux besoins nutritionnels des cultures.	89
Annexe 15 : Recherche bibliographique relative aux impacts des architectures racinaires sur la compacité du sol.....	90
Annexe 16 : Les étapes de travail permettant de calculer le nombre MR par couple de spéculations. .	92
Annexe 17: Les étapes de travail permettant de calculer les besoins en éléments minéraux de chaque spéculation.....	98
Annexe 18 : Les étapes de travail permettant de calculer les besoins en matière organique de chaque spéculation.....	101
Annexe 19 : Les étapes de travail permettant de déterminé l'impact des racines sur les propriété physique du sol pour chaque spéculation.	103
Annexe 20 : Représentation graphique des 6 type d'exploitation agricole dont les trajectoires ont été modélisé dans la publication Durant et all.	107
Annexe 21 : Succion de culture traditionnelle hérité de la pratique du jardin créole dans les Antilles française.	114
Annexe 22 : Scripte Matlab permettant d'évaluer les trajectoires d'exploitations.....	116

Sigles et acronymes

BISQ ou IBQS : Indicateur Biologique de Qualité du Sol.

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

DOM : Département français d'Outre-Mer.

GFA : Groupements Fonciers Agricole.

IDEA : Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

K : Potassium.

MR : Maladies et Ravageurs.

MO : Matière Organique.

N : Azote.

OP : Organisation de Producteurs.

P : Phosphate.

PBS : Production Brute Standard.

PEYI : Plateforme Expérimentale des Agro synthèses Innovant.

POSEIDOM : Programme d'Options Spécifiques à l'Eloignement et à l'Insularité des Départements français d'Outre-Mer.

RUP : Région UltraPériphérique.

SAU : Surface agricole Utile.

SICA : Sociétés d'Intérêt Collectif Agricole.

STH : Surface Toujours en Herbe.

UA : Université des Antilles.

UE : Unité Expérimentale.

UGB : Unité Gros Bovin.

UTA : Unité Travail Annuel.

1) Introduction

Le système actuel de production agricole mondiale découle de la « **révolution verte** » qui a eu lieu entre 1960 et 1990. Dans le contexte d'après-guerre, les innovations scientifiques et techniques impulsées par le gouvernement ont permis l'émergence de nouveaux engrais, produits phytosanitaires et semences performantes. La production agricole en **quantité suffisante** pour nourrir la population, était un impératif. L'agriculture s'est alors orientée vers un **système de production industrielle, consommatrice en intrants** : produits phytosanitaires et fertilisants chimiques (Paungfoo-Lonhienne, et al. 2012).

Cependant, ce système est à l'origine de **pollution** de l'eau, de l'air et des sols. Les ressources du sol ont été exploitées au-delà de leurs **limites de durabilité** l'activité biologique des sols a été fortement affectée (Amundson, R et al 2015). Les changements globaux qui affectent notre planète impactent d'ores et déjà l'activité agricole. Les territoires tropicaux insulaires comme les Antilles françaises sont particulièrement exposés aux conséquences du **changement climatique** : montée du niveau de la mer, augmentation de la fréquence des cyclones (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et al 2015). L'activité agricole dans les territoires insulaires est donc de fait **vulnérable** à ces changements.

Dans ce contexte, le projet **GAIA TROP** a vu le jour en 2013. Il implique plusieurs organismes français : l'INRA Antilles-Guyane (URZ et UR ASTRO), l'université Paris Dauphine (Leda Sdfi) et le CIRAD de Montpellier (UMR Innovation). Il a pour objectif l'étude de **la viabilité et de la gouvernance adaptative des agrosystèmes insulaires tropicaux**. L'étude de la viabilité est l'étude de la trajectoire ou le chemin permettant d'aboutir à une structure qui se perpétue dans le temps. Ce projet étudie l'adaptation des agrosystèmes dans les petits territoires insulaires face aux changements globaux. Le modèle **GAIA SCOPE** est l'une des composantes de ce projet.(Angeon Valérie 2017). Ce modèle se base sur **la théorie mathématique de la viabilité** (Aubin 2009) pour proposer des **trajectoires d'exploitations agricoles viables à long terme** en fonction d'un certain nombre de contraintes liées aux risques globaux. La notion de viabilité choisie dans ce modèle se base sur des paramètres **économiques et environnementaux**, à savoir respectivement, le revenu cumulé de l'agriculteur et la qualité de sol de la parcelle cultivée, grâce à l'indicateur BISQ. L'objectif du modèle GAIA SCOPE est de sélectionner une trajectoire d'exploitation permettant de restaurer la qualité du sol de la parcelle tout en subvenant aux besoins financiers de l'agriculteur. La trajectoire d'exploitation se traduit dans le modèle par une **succession culturelle** qui peut s'étendre sur une période de **40 ans**, en identifiant les **pratiques agricoles** qui sont associées. (Durand et al. 2017)

Le travail présenté dans ce mémoire vise à identifier les paramètres à incrémenter au modèle GAIA SCOPE pour que les propositions de trajectoires d'exploitations agricoles soient **agronomiquement cohérentes**. Dans la réalité, le choix des successions culturelles mises en place sur une parcelle est fait par l'acteur principal : l'agriculteur, selon un ensemble complexe de critères économiques, pédoclimatiques,...(France et al. 2009) Nous chercherons à mettre en évidence les règles de décision qui permettent de rendre le choix des succions de culture faite par le modèle, agronomiquement cohérent. Nous nous concentrerons sur les aspects purement **agronomiques**. L'étude porte sur le territoire des **Antilles françaises** et plus particulièrement sur la **Guadeloupe**.

Nous exposerons tout d'abord **le contexte** de travail dans les Antilles françaises, puis les caractéristiques de l'agriculture guadeloupéenne ainsi que les spéculations sur lesquelles le modèle se base pour proposer les successions culturelles. Puis nous présenterons la notion de viabilité d'une exploitation agricole. Le fonctionnement du modèle GAIA SCOPE et son schéma conceptuel seront présentés. Dans un second temps nous expliciterons **le matériel et la méthode** utilisés pour la réalisation de ce travail. **Les résultats** seront organisés par critère de choix agronomique, chacune ayant sa propre thématique. La seconde partie des résultats consiste en une étape d'évaluation des règles de décision. Elle se base sur une critique des sorties graphiques du modèle GAIA SCOPE au regard des règles de décisions et d'une proposition de nouvelle trajectoire d'exploitation. À la lumière des résultats, dans une dernière partie, nous **discuterons** les résultats et la méthode utilisée, ainsi que les limites et les perspectives de travail.

2) Contexte et état de l'art

Le projet GAIA TROP a pour objectif d'accompagner la **transition agro écologique** dans le domaine de l'agriculture. Dans un contexte de changements globaux, les écosystèmes sont touchés, leurs fonctionnements et les services écosystémiques qui leur sont associés sont modifiés. Les agro écosystèmes sont de ce fait impactés également, leur capacité à s'adapter aux changements en est modifiée. L'objectif d'accompagnement vers **l'écologisation effective de l'agriculture Antillaise** amène à envisager l'agriculture comme doublement performante, à la fois sur le plan **économique**, elle permet de dynamiser une région, que sur le plan **écologique** avec les services associés tels que la restauration des sols. Ce travail est mené à l'échelle de l'exploitation agricole sur le territoire des Antilles françaises. Le modèle **GAIA SCOPE** est l'un des livrables de ce projet, le modèle prend en compte les objectifs de **double performances agricoles**. Ce modèle permet de déterminer les modalités en termes de choix de spéculation végétale et de pratique culturale (conventionnelle ou agroécologique) qui permettent d'atteindre les objectifs d'écologisation de l'agriculture. (Angeon Valérie 2017)

Les résultats du projet GAIA TROP s'articulent au projet AgroEcoDiv qui a pour objectif de concevoir de façon innovante et dans une démarche agroécologique, des systèmes de production agricoles **performants et résilients** pour les territoires de Guadeloupe. Les partenaires du projet AgroEcoDiv sont l'INRA, le CIRAD et l'Université des Antilles (UA). Le projet s'articule autour de plusieurs étapes. L'organigramme est visible en annexe 1. Le projet GAIA TROP vient en appui au niveau de l'étape WP3. L'objectif du WP3 est de concevoir et d'évaluer des systèmes innovants pour **accompagner la transition agroécologique** des systèmes spécialisés et des agroécosystèmes durables. (Conseil régional de Guadeloupe 2016). Le modèle GAIA SCOPE, présenté ultérieurement apporte un cadre pour l'étude et l'évaluation de la viabilité d'agrosystèmes innovants.

Un triple encadrement a été effectué lors de ce travail avec Valérie Angeon chercheuse dans l'unité zootechnique (INRA), Jean Louis Diman directeur de l'unité PEYI (INRA) et Samuel Bates maître de conférences à l'université de Paris Dauphine. Ce travail a été effectué au sein de l'INRA Antilles Guyane basé en Guadeloupe sur le domaine de Duclos.

2.1. L'agriculture des Antilles Françaises

2.1.1. Les Antilles Françaises territoire d'étude privilégié pour étudier la viabilité en agriculture.

Le Projet GAIA TROP a pour objectif d'étudier **la viabilité et la résilience des petites exploitations agricoles en contexte insulaire tropical**. Pourquoi avoir choisi comme cadre d'étude les Antilles Françaises ?

Les îles des Antilles françaises **crystallisent la diversité des environnements tropicaux**. Un grand nombre d'écosystèmes et d'environnements représentatifs des tropiques est observable sur une petite surface d'étude. En effet, à l'échelle de la Guadeloupe le zonage agroécologique met en évidence **23 zones**, (LUCIEN BRUN Maël 2014) avec des caractéristiques liées à la pédologie, à la pluviométrie, à la morphologie du terrain, à la couverture végétale, aux effets climatiques et aux unités paysagères. Les données relatives à ces différentes caractéristiques du milieu ont été agrégées pour donner la carte suivante.

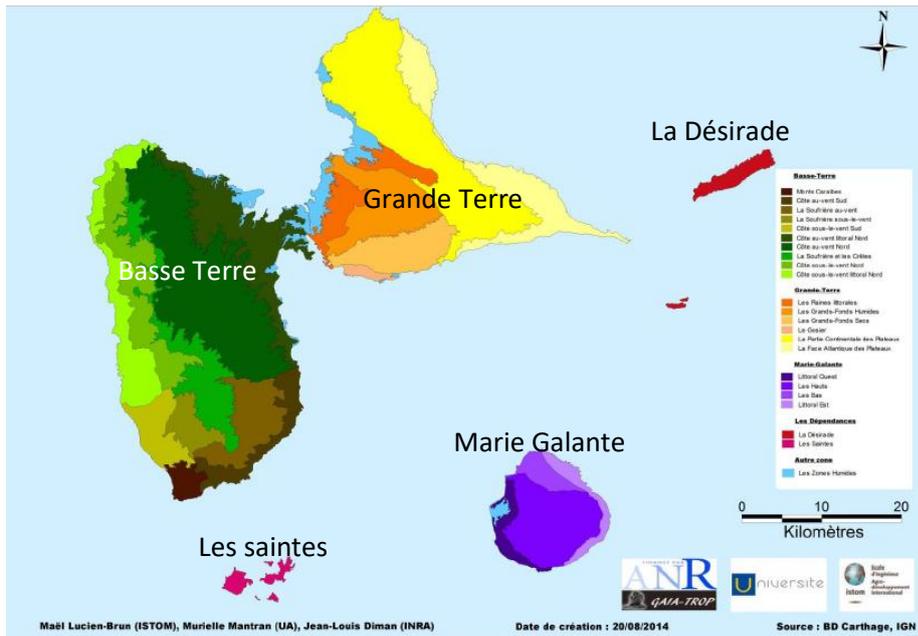


Figure 1: Zonage agroécologique de l'archipel de Guadeloupe. Source : LUCIEN BRUN Maël 2014.

Voir en annexe 3 et 4 pour plus d'informations relatives au contexte pédo climatique et historique de la Guadeloupe.

Présentation de la structuration des exploitations agricoles guadeloupéennes aujourd'hui.

L'agriculture **emploie 12 %** de la population active en Guadeloupe. Cette activité couvre un tiers de la surface de l'île. En Guadeloupe, les 7 804 exploitations agricoles recensées en 2010 occupent une surface agricole utile (SAU) totale de 31 401 hectares. L'assolement de la Guadeloupe est le suivant, visible sur la figure X. L'activité agricole dans son ensemble contribue pour **6 % au produit brut régional** (AGRESTE 2010).

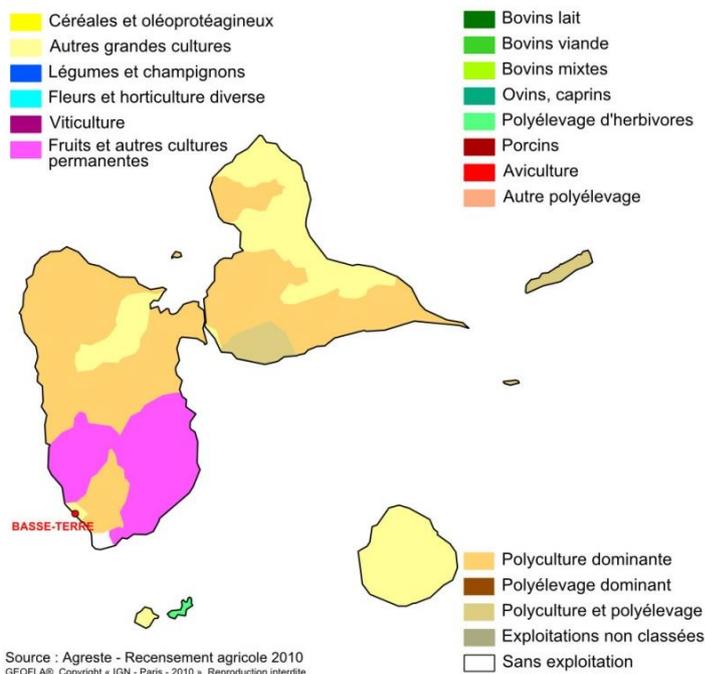


Figure 2: Assolement du territoire guadeloupéen Agreste – recensement agricole 2010.

Voir en annexe 7 pour plus d'informations relatives aux structures d'exploitations agricole guadeloupéenne aujourd'hui.

2.1.2. Enjeux agronomiques des systèmes insulaires : notion de succession culturale et présentation des cultures étudiées.

Le modèle sur lequel nous allons travailler simule des successions de cultures, nous nous intéresserons aux caractéristiques agronomiques des **13 cultures** considérées par le modèle. Dans le modèle et dans la suite de ce document, les cultures seront considérées comme des **spéculations**. La liste des spéculations et de leurs caractéristiques est présente en annexe 8.

2.1.3. Trajectoire d'exploitation : les successions culturales au cœur du sujet.

Les **trajectoires d'exploitations** agricoles proposées par le modèle GAIA SCOPE, sont des trajectoires d'exploitations à **long terme**, jusqu'à 40 ans. Les trajectoires explicitent les successions culturales que l'agriculteur peut mettre en place sur une parcelle de **1ha**, pour arriver aux performances de **restauration du sol** et les **performances économiques** annoncées par le modèle. La notion de succession culturale est donc un sujet central pour ce travail. Nous travaillerons pour apporter une **cohérence agronomique** aux successions culturales proposées par le modèle, pour cela nous allons tout d'abord définir ce terme et identifier les propriétés agronomiques qui en découlent.

2.1.3.1. Définition d'une succession culturale

Une **succession de cultures** consiste à changer chaque année (ou toutes les n années) l'espèce cultivée dans une parcelle. Si la même culture revient de manière cyclique sur la même parcelle (toutes les n années), on parle de rotation de cultures (Sebillotte M 1990) (Tayeb Ameziane El Hassani - Etienne Persoons 1995) et (Morlon 2018). La succession des cultures est une nécessité technique, en effet, de nombreuses cultures **ne supportent pas d'être produites plusieurs années de suite** sur la même parcelle. La **diversification** culturale dans les successions de culture fait se succéder des cultures variées qui consomment des ressources différentes et donc évite **l'épuisement des ressources** par une surconsommation unique. (Ph.Prevost 1990).

2.1.3.2. Concept d'effet précédent et de sensibilité du suivant

La réflexion sur le choix de la mise en place des successions culturales sur une parcelle se fait à la lumière des **caractéristiques de chaque culture** mais aussi des interactions qui existent entre chacune des cultures, via la **modification du milieu**. De ce fait, on ne peut parler de succession de culture sans parler des **effets précédents** : c'est la variation de l'état du milieu d'une parcelle sur le plan de son état physique, chimique et biologique, entre le début et la fin de la culture considérée. Ces modifications découlent de l'influence combinée du peuplement végétal et des techniques qui lui sont appliquées ainsi que celle de l'environnement extérieur au système comme le climat. (Voir figure 3) Ces variations du milieu agissent ensuite sur la culture nouvellement mise en place. Les successions sur plusieurs années peuvent modifier le milieu par addition des effets précédents : on parle **d'effet cumulatif**. La **sensibilité aux suivants** se définit par l'ampleur des réactions de la culture précédente (le suivant) à la diversité des états du milieu créée par la culture précédente, sous un climat donné et compte tenu des techniques culturales utilisées sur la culture présente (Sebillotte M 1990).

C'est à partir de ces modifications du milieu que va se faire le choix des spéculations à mettre en place dans le but **d'optimiser** l'utilisation des caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu pour le développement des cultures sur un horizon à long terme. Nous souhaitons réfléchir à la viabilité sur 40 ans, il faut donc avoir une vision de **gestion durable des ressources du milieu**. Les modifications du milieu peuvent se situer au niveau de :

- **L'ameublissement de la structure du sol** : cette caractéristique physique du sol peut être modifiée par le travail mécanique du sol, le **développement des racines** pour la prospection

racinaire et par la couverture du sol par la végétation qui protège le sol des pluies et donc de l'érosion. Ce sont autant de paramètres variables en fonction du type de culture mise en place.

- **La teneur en matière organique du sol** : la MO du sol est notamment enrichie par l'humification des résidus de cultures. Selon le type de culture sur la parcelle, elle peut laisser à la suite de son cycle de production une plus ou moins grande quantité de résidus de culture. Par exemple la banane avec l'effeuillage laisse une quantité importante de résidus de culture. En revanche la laitue et le chou ne laisse pas de résidus.
- **La teneur en éléments minéraux du sol** : certaines plantes sont très exigeantes en éléments minéraux. A contrario d'autres cultures enrichissent le sol en éléments minéraux, elles sont qualifiées d'améliorantes. Par exemple les légumineuses sont améliorantes car elles enrichissent le sol en azote grâce à une symbiose avec une bactérie (*Rhizobium*) fixatrice d'azote atmosphérique N₂. Par exemple une parcelle de luzerne la fourniture d'azote lié a la minéralisation permet d'apporter entre 100 et 160 kg N/ha sur les 18 premiers mois avec plus de 50 % de l'azote libéré dès la première année. (Arvalis 2010)
- Le développement des adventices des cultures : certaines adventices sont difficiles à éradiquer d'une parcelle même avec des pesticides car elles ont une physiologie proche de la culture en place.
- **Le développement de maladies et ravageurs** : le principe est identique à celui des adventices. Si la culture précédente avait permis le développement de certaines maladies et/ou le parasitisme de certains ravageurs, le choix de la culture suivante peut se faire de telle sorte que les maladies et ravageurs ne puissent plus se développer sur celle-ci car ils ne peuvent retrouver leur hôte de choix. Ils sont alors amenés à se déplacer hors de la parcelle cultivée ou bien de mourir. Voir figure 3.

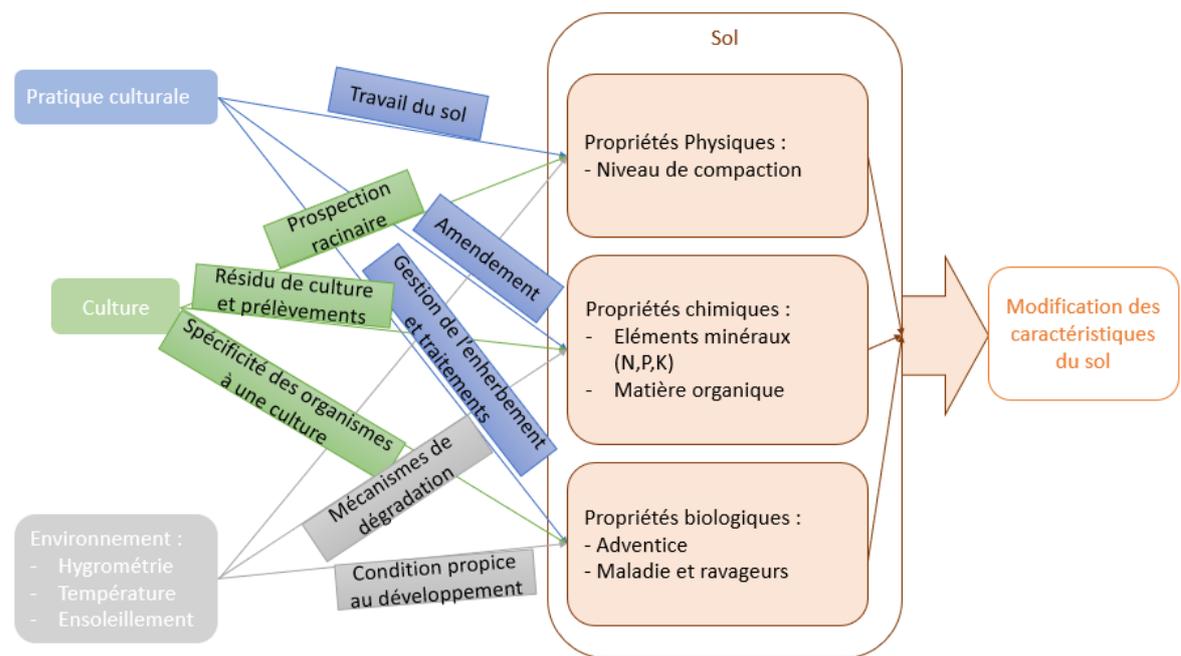


Figure 3 : schématisation des effets précédents d'une culture sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Lors de ce travail nous nous intéresserons particulièrement aux effets des cultures, représentés en vert.

Les perturbations du milieu causées par les cultures sont bien réelles, mais elles peuvent être atténuées par les pratiques culturales telles que : l'épandage d'engrais pour renouveler les éléments minéraux du sol prélevés par la culture, le désherbage qui limite la présence des adventices. Un des **leviers d'action fondamental** est la réflexion sur le **choix des successions** culturales. Elles peuvent jouer un rôle important **pour limiter les perturbations du milieu** tel que le développement de foyers de ravageurs dû à la présence de mêmes cultures plusieurs cycle de production à la suite. La diversification

successions de culture permet de limiter ce phénomène. Le choix des successions peut également rendre **bénéfiques** ces perturbations du milieu pour les cultures. Par exemple l'action de décompactation des racines de certaines cultures sur les propriétés du sol sont favorable à l'implantation de nouvelles cultures. (Ph.Prevest 1990)

Le choix des successions culturales découle donc de l'impact des cultures sur leur milieu. L'objectif étant de faire se succéder des cultures ayant **des exigences différentes**. La liste des facteurs influençant le choix des successions de cultures sur une même parcelle est la suivante :

- L'horizon de sol exploré par le système racinaire de chaque culture.
- Les besoins nutritionnels respectifs de chaque culture.
- La sensibilité de chaque culture aux maladies et ravageurs.
- Le travail du sol nécessaire à la mise en place de chaque culture.
- La date de semis et de récolte de chaque culture.
- L'insertion de période de jachère dans la succession. (Sebillotte M 1990).

2.1.3.3. Des successions culturales sur 40 ans

Les successions culturales peuvent être réfléchies à **différentes échelles de temps**. Lorsque l'on parle de rotation (cas particulier d'une succession de culture en rotation), elles peuvent être envisagées sur quelques mois jusqu'à plusieurs années. Cela dépend du type de culture mise en place : pérenne ou annuelle. Selon l'échelle de temps choisie, les **indicateurs de viabilité** qui semblent pertinents sont différents. En effet à une courte échelle de temps les indicateurs de rendements, de revenus, de rentabilité et de valorisation directe de la production sont plus importants que des paramètres comme la qualité du sol évaluée à partir d'indicateurs comme la teneur en matière organique ou l'activité biologique des sols, l'impact environnemental de l'activité agricole sur le milieu environnant (qualité de l'eau et de l'air), les indices de biodiversité et le développement d'un tissu socio-territorial autour de l'activité agricole. A court terme il semble que les indicateurs purement économiques et de rendement soient plus pertinents que des indicateurs **environnementaux et sociaux** qui ont une évolution plus lente et donc observable seulement à **long terme**. A noter tout de même que l'utilisation d'**indicateurs économiques** est **pertinente** aussi bien à court terme qu'à long terme.

L'horizon de temps choisi dans le cadre de ce travail est à l'échelle du **fonctionnement d'une exploitation agricole**. La notion de transmission à la génération suivante est importante dans la conception de la viabilité vue par les agriculteurs des Antilles Françaises. Le modèle GAIA SCOPE a donc été pensé par les concepteurs, dans le but d'étudier des trajectoires d'exploitation sur une échelle de temps maximale de **40 ans** qui représente la durée de vie moyenne d'une exploitation agricole. L'objectif étant de **transmettre** une exploitation agricole viable avec une qualité de sol suffisante pour continuer à produire et d'obtenir un revenu suffisant. Les deux indicateurs pris en compte dans le modèle GAA SCOPE sont d'ailleurs **la qualité de sol** avec l'indicateur **BISQ** et la **viabilité économique** avec le **revenu cumulé**.

2.1.4. Enjeux économiques des systèmes insulaires

Les Antilles françaises sont un département français depuis 1946, ces îles sont étroitement reliées à la métropole. Ce type d'insularité est appelé **hypo insularité** d'après (Taglioni 2006). Ces îles bénéficient d'un haut **niveau de développement**, elles sont **économiquement intégrées** dans le marché mondial et relativement bien desservies par les voies aérienne et maritime. Dans ce contexte, les exploitations agricoles guadeloupéennes sont majoritairement des petites exploitations en surface et en taille économique. A la différence de la métropole où les tailles d'exploitation ne sont pas comparables. Des spécificités insulaires sont donc bien observables en Guadeloupe.

Des contraintes spécifiques touchent les îles et en impactent leur économie. Les **coûts** sont plus importants car une partie des produits de consommation est issue de la métropole, le coût de transport

s'ajoute donc au prix initial. Dans le domaine de l'agriculture deux tendances sont observées. Soit la production est historiquement destinée à l'**export**, c'est le cas de la filière banane dessert et des produits issus de la canne à sucre, soit elle est destinée au **marché local**. C'est le cas des productions maraichères et vivrières de diversification. La problématique de **viabilité** et de **résilience** des exploitations est fondamentale dans les territoires insulaires. C'est encore plus vrai qu'ailleurs, pour assurer les apports de denrées alimentaires aux **territoires locaux**.

Les indicateurs de performance économique des exploitations agricoles sont nombreux. Plusieurs paramètres peuvent être étudiés selon les modèles. Par exemple la méthode utilisant l'Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles (**IDEA**) qui est une analyse multi critères de la durabilité des exploitations évaluées sur la base de trois indicateurs : la durabilité environnementale, la durabilité socio-territoriale et la durabilité économique. (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation 2016) Une des parties de la durabilité économique est basée sur la viabilité, qui représente un **résultat économique moyen par actif de l'exploitation** (évaluée par rapport au SMIC). Cet indicateur de Viabilité Economique (VE) est calculé de la manière suivante : $VE = \frac{\text{Excédent Brut d'Exploitation} - \text{Besoin Financement}}{\text{UTH non salarié avec Besoin Financement} = \frac{1}{2} \text{amortissements} + \text{annuités}}$. (Etudiants des spécialités - Génie de l'environnement, option ADT- Productions Végétales, option IA 2011).

Le modelé GAIA SCOPE fait un suivi de l'état économique des exploitations agricoles à partir du **revenu cumulé** (la trésorerie, la caisse) à tout instant. C'est le **bilan des activités financières** de l'exploitation. Il peut être positif ou négatif. Les paramètres pris en compte à chaque cycle de production sont : les subventions pour la spéculation, les subventions pour la production, les coûts mensuels de travail d'entretien, les coûts d'installation de la culture (graines, fertilisants, herbicides, fongicides etc.). Les autres dépenses, les coûts de main d'œuvre de récolte, les coûts d'intrants d'entretien, les coûts fixes non liés à une spéculation spécifique, les rendements moyens effectifs, les rendements nominaux et les prix de vente de la production. Cet indicateur peut être calculé à chaque fin de cycle de production et permet de suivre l'évolution de l'**état économique de l'exploitation**. Le revenu cumulé permet à la fois le suivi précis à court terme et sur une grande échelle de temps.

2.1.5. Sensibilité des systèmes insulaires au changement climatique

Les petites îles du Pacifique et des **Caraïbes** vont être touchées par les changements climatiques. L'élévation du niveau de la mer (entre **0,26 et 0,82 m**) devrait s'intensifier en conséquence de la fonte des glaces dû à la hausse des températures (entre 0.3 et 4.8°C), Cela provoquera des événements climatiques plus fréquents et violents : des **inondations** de plus en plus fortes, des **ondes de tempêtes** et l'érosion des côtes. Les ressources en eau vont également être fortement impactées, durant les périodes sèches du carême en Guadeloupe. La **demande en eau risque de ne pas pouvoir être satisfaite**. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Pachauri, et Meyer 2015)

L'agriculture en plein champ dans les territoires **insulaires caribéens** est particulièrement sensible aux changements climatiques par définition puisqu'elle est directement exposée aux **aléas extérieurs**, à savoir la température, l'ensoleillement, les précipitations, le taux d'humidité, la puissance et l'orientation des vents et de multiples autres facteurs. Les régimes de précipitation vont être modifiés, les périodes sèches (carême) vont être plus sèches et donc obliger les agriculteurs à **gérer leurs réserves en eau** (stockage, culture adaptée à la sécheresse) et les périodes pluvieuses, plus importantes en intensité. L'érosion des sols causée par ces forts événements climatiques va être préjudiciable pour l'agriculture guadeloupéenne. La disparition des terres arables est un problème en Guadeloupe, où la **pression foncière est forte**. Dans ce contexte insulaire la conception d'**agrosystème innovant résilient et viable**, est fondamentale. L'accompagnement vers une **écologisation des pratiques** pour que l'activité agricole soit à la fois **économiquement et écologiquement viable à long terme**, est indispensable.

2.2. Caractérisation de la théorie de la viabilité.

2.2.1. Définition et cadre théorique

La viabilité, est un dérivé du latin « via » qui signifie voie, chemin, avec le suffixe -abilité. Etymologiquement la viabilité renvoie également à la notion de **vie** et de survie. Par sa double étymologie, la notion de viabilité semble appropriée pour analyser la **dynamique** de système divers. La diversité des systèmes pour lesquels la viabilité peut être étudiée est importante, nous en verrons quelques illustrations par la suite. En effet, viabilité renvoie, d'une part à la notion de chemin, **d'itinéraire suivi** et, d'autre part, à la notion de vie, d'aptitude à vivre. Discuter de la viabilité d'un système c'est discuter **des chemins** qu'il peut suivre pour **survivre, perdurer**, sans forcément se reproduire à l'identique. (Barbier Bruno et al, 1997).

La théorie de la viabilité permet de modéliser des systèmes dynamiques complexe contrôlés, soumis à un ensemble de **contraintes de viabilité**. Elle permet d'élaborer des modèles de système qui s'adaptent à leur environnement en ne faisant qu'un nombre réduit d'hypothèses sur le futur. Les évolutions du système sont bornées par des **contraintes** au sein desquelles les contrôles peuvent prendre n'importe quelles valeurs. Pour chaque état du système, il existe un certain nombre d'évolutions gouvernées par le système dynamique contrôlé. On cherche à déterminer les suites de contrôles qui permettent à une évolution de satisfaire les contraintes de viabilité. Les évolutions qui restent dans l'ensemble des contraintes sont dites viables. L'ensemble de tous les états du système à partir desquels part au moins une évolution répondant aux contraintes de viabilité, est appelé le **noyau de viabilité**, il peut y avoir une diversité de trajectoires possibles. (Bernard Claire 2012).

Cependant les travaux faits à partir de modèle d'optimisation dynamique, ne proposent (dans certains cas) qu'une unique solution. (TICHIT Muriel et al 2004).

La théorie de la viabilité est un outil permettant d'étudier le développement durable d'un système complexe. (Durand, Martin, et Saint-Pierre 2012). Les notions de durabilité et de viabilité sont intimement liées dans ce travail.

2.2.2. Méthodes d'évaluation de la viabilité.

Une **diversité de méthodes** existe pour étudier la viabilité, nous présentons ci-dessous plusieurs façons d'envisager la viabilité en rapport avec des notions environnementales et agricoles. Toutes les études présentées sont basées sur la **théorie de la viabilité**, tout comme le modèle **GAIA SCOPE** qui sera exposé à la suite.

Tableau 1 : Etat des lieux de la diversité des domaines dans lesquels la théorie de la viabilité est utilisée.

Source de l'étude	Objet d'étude	Problématique	Pas de temps d'évaluation de la viabilité	Critères (ou indicateurs) de viabilité retenus	Conclusions ou utilisation des résultats de l'étude
Sabatier et al, publié en 2015	Les agrosystèmes de prairie	Quel est en terme quantitatif la résistance ¹ et la flexibilité ² d'un	Plusieurs années	Le chargement ³ Et Le niveau de production de	La gestion adaptative permet de tirer parti de la variabilité environnementale et d'augmenter le niveau de production, tandis que les stratégies de gestion

¹ Résistance : Stratégie de gestion basé sur la résistance du system a resté viable face à une large gamme de condition environnementale.

² Flexibilité : Stratégie de gestion basé sur la surveillance et l'adaptation des stratégies de gestion en réponse aux perturbations.

³ Chargement : Il est égal au rapport entre les surfaces utilisées et l'effectif moyen d'animaux présents sur ces parcelles exprimé en UGB (Unité Gros Bovin).

		ensemble de séquences de pâturages viables ?		fourrage	basées sur la résistance sont cohérentes lorsque les gestionnaires ne visent pas une production maximale et peuvent conserver une marge de manœuvre pour faire face à des événements imprévus.
Tichit et al, publiée en 2004	La gestion de troupeaux	Quel est l'effet des pratiques de gestion de troupeaux sur la durabilité des systèmes d'élevage en contexte climatique incertain ?	La durée de vie d'une exploitation	L'efficacité et l'efficacités	Il n'a pas été possible de conclure sur l'effet des pratiques. En revanche, la richesse est un paramètre identifié pouvant influencer l'évolution de la viabilité du système.
Doyen et al, publiée en 2013	La gestion durable de la biodiversité pour des ressources renouvelables (exemple du domaine de la pêche ou de la chasse)	Comment encadrer la gestion des stocks de ressource renouvelable pour atteindre la durabilité ?	Variable	rendement maximal durable, qui maximise la quantité de capture à l'équilibre et le rendement économique maximal, qui maximise les bénéfices à l'équilibre en intégrant les données économiques.	Etude générale sur les méthodes de modélisation pour les problématiques écologiques et économiques. Permet de mettre en évidence l'utilité de la théorie de la viabilité
Mouysset et al, publiée en 2014	Utilisation des terres et de gestion de la biodiversité des sols en agriculture	Quelles sont les différentes politiques publiques et les différents scénarios ayant un risque agroécologique acceptable ?	Horizon de temps jusqu'en 2050	Indicateurs de biodiversité et de viabilité économique	Cette étude a permis d'éclaircir les questions et les scénarios de politiques publiques en termes d'agriculture multifonctionnelle et d'utilisation durable des terres et des écosystèmes agricoles. Des combinaisons de taxes et de subventions ont été étudiées pour voir dans quelle mesure elles favorisent la conciliation des objectifs écologiques et économiques sur les prairies.

Voir en annexe 9 pour plus de détails sur les différentes études de cas de la viabilité.

Après avoir effectué cet état des lieux de l'utilisation de la **théorie de la viabilité** pour la modélisation mathématique d'évènements de nature variable allant de l'agriculture à l'écologie avec un paramètre économique, nous allons nous intéresser maintenant au cas du **modèle GAIA SCOPE**.

2.2.3. Le modèle GAIA SCOPE et la notion de viabilité

La définition de la viabilité des exploitations agricoles présentée dans le projet GAIA a été choisie dans un premier temps par une méthode de construction participative avec des agriculteurs volontaires. Les résultats de cette étude sur le territoire des Antilles françaises (Guadeloupe et Martinique) ont permis **de faire émerger une définition de la viabilité** qui repose sur la notion de pérennité dans le temps en fonction des contraintes économiques, sociales et environnementales (Valérie Angeon et al 2014). L'agrosystème viable doit satisfaire à des objectifs selon trois dimensions

: agroécologique, économique et socio-culturelle. Les résultats de la consultation participative avec les agriculteurs ont donné les résultats suivants :

1. Les paramètres pour lesquels les agriculteurs apportent une importance vis-à-vis de la viabilité sur la **dimension environnementale** sont les pratiques culturales et la pollution. Les principales contraintes auxquelles font face les agriculteurs sont la qualité des ressources naturelles, les compétences et le règlement.
2. Pour la **dimension économique** de la viabilité, les agriculteurs jugent la gestion de l'exploitation et la production de ressources comme les principaux objectifs. Les contraintes qui s'y opposent sont assez nombreuses, on peut citer l'accès au capital humain et financier, les barrières administratives, l'accès et la maîtrise du marché.
3. Et enfin pour la dimension **socio-culturelle** de la viabilité, les agriculteurs font le choix volontaire de leur métier car l'activité agricole est porteuse d'une vision et représente une activité créatrice de richesse au sens large du terme. En revanche les agriculteurs se heurtent à un formatage des agrosystèmes et une faiblesse au niveau de « l'éducation » des agriculteurs.

(Valérie Angeon et al 2014).

Cette première phase de consultation a précédé la création du modèle GAIA SCOPE et a permis de faire émerger les deux paramètres sur lesquels se base le modèle GAIA SCOPE pour étudier la viabilité :

- **L'aspect économique** : une exploitation est viable si les revenus que dégage l'exploitant agricole sont suffisants pour vivre de son activité. Dans le modèle, les revenus financiers initiaux sont inférieurs ou égaux aux revenus cumulés à la fin de tous les cycles de production. C'est à dire au bout des 40 ans.
- **L'aspect écologique** : la qualité des sols sur lesquels travaille l'agriculteur doit être suffisante pour que les cultures mises en place sur les parcelles puissent produire suffisamment en quantité et en qualité. Dans le modèle cette contrainte se traduit par le fait que la valeur de l'indicateur de qualité des sols, le BISQ (Indice biotique de qualité des sols) à l'état initial soit inférieur ou égal à la valeur du BISQ à l'état final au bout des 40 ans.

Une exploitation agricole est considérée viable à partir du moment où les paramètres de viabilité à savoir la qualité biologique du sol et les revenus financiers de l'exploitation, restent égaux ou supérieurs aux seuils choisis par l'opérateur du système. Les propriétés mathématiques particulières du système dynamique retenu dans GAIA SCOPE permettent d'établir une relation particulière entre les composantes économique et agronomique des états initiaux viables. Pour chaque état initial du sol le modèle établit une valeur minimale de trésorerie de l'exploitation permettant de garantir qu'une évolution viable est possible sur une durée de 40 ans. Ainsi, **le seuil économique de viabilité est calculé et il dépend de l'état initial du sol de l'exploitation**. Cet état initial est **défini par le modélisateur** en fonction de la situation qu'il souhaite évaluer.

Le modèle GAIA SCOPE fait l'hypothèse que **la viabilité** d'une exploitation repose sur les deux paramètres suivants : **les revenus cumulés** de l'exploitant d'une part, et **la qualité biologique du sol** d'autre part. Le BISQ dans sa construction et son calcul ne prend en compte que l'activité biologique du sol à travers le comptage des macro-invertébrés (Durand et al. 2017).

Le modèle mathématique utilisé dans GAIA SCOPE permet de produire **un noyau de viabilité** composé de plusieurs trajectoires d'exploitations viables. Ces trajectoires sont sélectionnées à partir d'un état initial donné, défini par l'opérateur du modèle. C'est l'évolution à partir de cet état initial sur un laps de temps donné (40 ans dans notre étude) qui nous intéresse. Un grand nombre de trajectoires d'exploitation est possible à partir d'un état initial donné. **Le corridor de viabilité** qui joue le rôle d'entonnoir pour sélectionner les trajectoires viables est défini par des contraintes sur les variables de contrôle du système. Dans notre cas, **les variables d'état** du système sont **la qualité de sol** avec le BISQ et **l'état financier de l'exploitation** avec le revenu cumulé. Les contraintes de viabilité ont été décrites précédemment. Si le noyau de viabilité n'est pas vide, cela signifie qu'à partir des conditions initiales déterminées, il existe **au moins une** trajectoire d'exploitation qui permet d'atteindre la cible. Nous allons à présent caractériser les deux indicateurs sur lesquels se base l'évaluation de la viabilité de GAIA SCOPE : la qualité du sol avec le BISQ et l'aspect économique avec les revenus cumulés.

2.2.4.1 La structure du modèle GAIA SCOPE

Le modèle conceptuel de GAIA SCOPE élaboré d'après la démarche de modélisation conceptuelle de Lamanda et al. 2012 est présenté dans la figure 4.

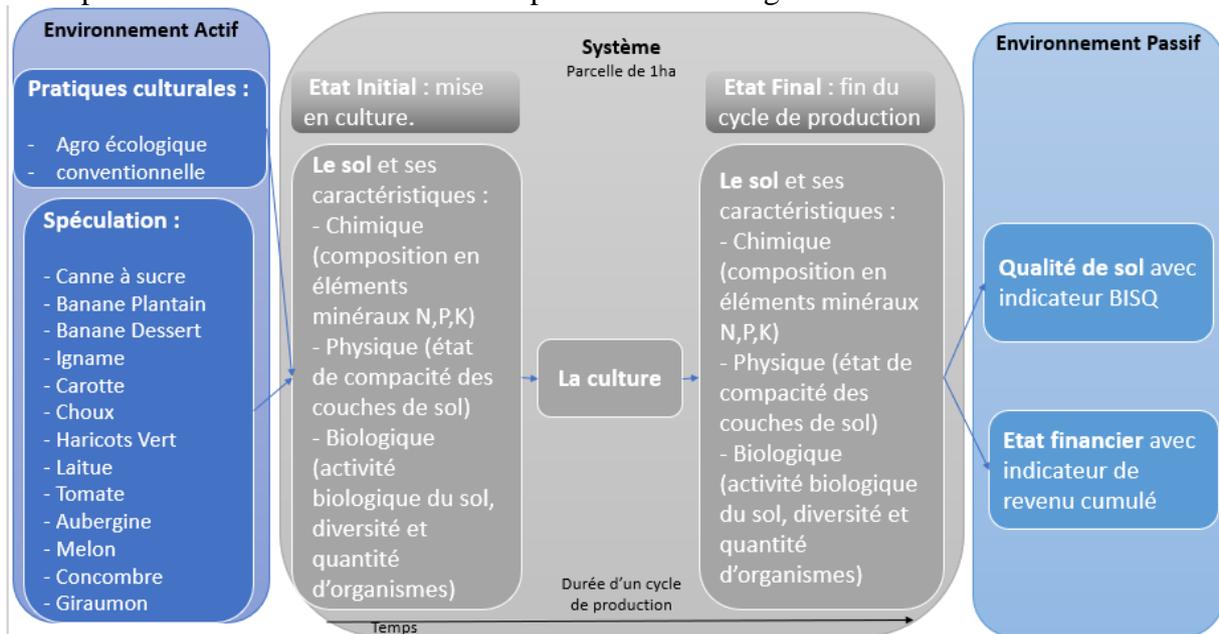


Figure 4 : Analyse structurelle du modèle GAIA SCOPE

La problématique à laquelle répond le modèle GAIA SCOPE est de savoir quelles sont les **trajectoires d'exploitation viable à long terme**. Plusieurs **contraintes** définies par l'opérateur en fonction du **type d'exploitation agricole** que celui-ci souhaite modéliser, sont imposées. Le cadre spatio-temporel de l'étude est choisi comme étant la trajectoire d'une parcelle de **1 ha** sur **40ans**.

L'analyse structurelle de GAIA SCOPE, permet de mettre en évidence deux composantes dans l'environnement actif : **Le choix de la pratique culturelle et de la spéculation**. Le paramètre « Pratique culturelle » possède deux modalités, ce sont des hypothèses de simplification choisis dans la construction du modèle GAIA SCOPE :

- **La pratique conventionnelle** d'après le modèle, est représentative de l'agriculture intensive et implique des coûts d'intrants plus élevés (équipement, produits chimiques) mais offre de meilleurs rendements indépendamment de la qualité du sol. Elle consiste à fournir systématiquement les apports nutritionnels essentiels à la croissance des cultures par des apports d'intrants de synthèse, quel que soit l'état du sol.

- **La pratique agroécologique** d'après le modèle, nécessite moins d'intrants chimiques, mais les coûts de main-d'œuvre peuvent être plus élevés et les rendements dépendent de la fertilité du sol. Elle consiste à prendre des mesures allant vers le maintien de l'équilibre naturel du sol, en tant qu'écosystème complexe, en intégrant les interactions avec les cultures.

La composante spéculation comprend 13 modalités qui sont les **13 spéculations** pour lesquelles le modèle a été paramétré. Les spéculations sont les suivantes : Canne à sucre, Banane Plantain, Banane Dessert, Igname, Carotte, Choux, Haricot Vert, Laitue, Tomate, Aubergine, Melon, Concombre, Giraumon.

Le système est constitué de la **culture** définie par le choix de la spéculation parmi les 13 modalités. La seconde composante du système est **le sol** qui est caractérisé par 3 paramètres, son activité biologique et ses caractéristiques physico-chimiques. Doran & Parkin.1994.et reprises par Doran et al. 1996. Dans le modèle le sol est caractérisé par l'indicateur BISQ qui ne prend en compte que l'activité biologique de cette composante.

L'environnement est composé de la **qualité du sol** à travers l'indicateur BISQ qui sera présenté ultérieurement. L'enrichissement économique est le second paramètre, il est mesuré par le **revenu cumulé** de l'agriculteur.

L'analyse fonctionnelle du modèle conceptuel permet de définir les relations entre les composantes. Les relations peuvent être d'ordre divers, flux de matière ou d'information ou bien des actions.

Dans le modèle GAIA SCOPE figure 4, les **pratiques culturales** ont un effet sur le **sol**. Le modèle fait l'hypothèse que le sol est impacté en fonction du type de pratique : agroécologique ou conventionnelle. Voir en annexe 11 comment est calculé le BISQ et quel est l'impact des pratiques sur celui-ci. L'utilisation de machines et la profondeur de l'opération agissent sur les **qualités physiques** du sol en le décompactant. Au contraire un passage de machine lourde alors que le temps de réessuyage n'a pas été respecté provoque un tassement du sol. Les pratiques culturales choisies ont également un impact sur la **plante**. En effet l'utilisation de produits phytosanitaires ou non pour traiter la plante contre les maladies qui la touche vont agir sur le développement de celle-ci. La pratique joue aussi sur la **composition biologique et chimique du sol**, c'est l'une des hypothèses du modèle. L'ajout d'engrais modifie la composition chimique du sol. Le travail du sol affecte l'activité biologique. Selon le type de pratique adoptée, les impacts sur la qualité du sol sont différents.

Dans le modèle GAIA SCOPE il a été mesuré par des analyses de sol discriminant les spéculations et les pratiques, que la pratique conventionnelle ait un impact négatif sur la biodiversité du sol et aggrave ainsi la dégradation du sol causée par les plantes, alors que la pratique agro écologique tend à compenser l'exploitation des ressources du sol par les cultures.

Le choix de la spéculation va impacter la **structure physique du sol** par la prospection racinaire de la culture. On suppose que chaque culture a une prospection racinaire différente. Une culture de laitue et une culture de canne à sucre ne vont pas avoir le même impact sur la porosité et la compacité du sol. Chaque culture impacte également la **composition chimique du sol** de part ces prélèvements en éléments minéraux nécessaires à son développement.

Le choix de la spéculation agit de ce fait sur la **qualité du sol** et sur le **revenu** de l'agriculteur. Du développement de la culture dépend le revenu de l'agriculteur. **La plante** agit sur le **sol** comme nous l'avons vu précédemment en influençant ses caractéristique physio chimiques et biologiques, le BISQ en est donc modifié selon la spéculation mise en culture.

La qualité de sol influence le **développement de la culture** et donc son rendement. De ce fait le revenu de l'agriculteur en est impacté.

La viabilité dans le modèle sera présentée ultérieurement, dans un premier temps nous allons voir sa définition.

2.2.4.1. L'Indice Biologique de la Qualité des Sol (IBQS ou BISQ) : Bio indicateur de la qualité des sols basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés : Définition et prise en compte.

Le modèle GAIA SCOPE est basé sur l'**Indice Biologique de la Qualité des Sol (IBQS ou BISQ)** pour évaluer la qualité du sol de la parcelle d'étude. La qualité de sol est noté **I**, l'état initial de la parcelle de 1 hectare étudiée est caractérisé par une valeur initiale de l'**BISQ**, noté **I0**. Après chaque cycle de production une nouvelle valeur de l'**BISQ** est calculée. La qualité de sol est une résultante du choix de la **spéculation** mise en place (13 spéculations du modèle) et de la **pratique** choisie (agroécologique ou conventionnelle). Voir annexe 11 la méthode de calcul du **BISQ**. Des relevés de sol ont été effectués sur l'ensemble du territoire guadeloupéen pour évaluer l'impact des cultures et des pratiques sur le sol.

Le **BISQ** est un indicateur basé sur l'étude du peuplement des **macro-invertébrés**. Chaque groupe d'espèces est caractérisé par un peuplement du sol différent. Chaque groupe **d'espèces s'adapte au milieu dans lequel il se trouve** en fonction de son alimentation et de sa capacité à vivre dans les

conditions climatiques et physico-chimiques du sol dans lequel il se trouve. De ce **fait l'étude des macro-invertébrés représente un bon indicateur du milieu**. (Camacho et al. 2009).

Un référentiel territorial des sols de Guadeloupe est effectué, il représente la diversité des sols de l'île. Les sols échantillonnés sont caractérisés par plusieurs paramètres :

- **chimique** : le pH, les cations potassique (K), calcique (Ca) et magnésique (Mg), la capacité d'échange cationique, le potassium assimilable et le sodium (Na).
- **physique** : la densité apparente, de la résistance tangentielle à la coupe, la résistance à la pénétration, la pente et la teneur en eau du sol au moment des prélèvements
- d'autres paramètres comme le taux de **matière organique** et la **morphologie**.

Les sols sont alors regroupés en classe ou groupe en fonction de leurs similitudes. A chaque groupe de sols sont **associés les macro-invertébrés** ayant une valeur indicatrice significative. Ainsi à partir des invertébrés trouvés, nous pouvons déterminer le type de sol.

- **Comment est calculé l'BISQ ? Que prend-il en compte ?**

La première étape consiste en un **l'échantillonnage** de la zone d'étude selon un protocole en grille ou en couche. Les macro-invertébrés sont extraits du sol, puis conservés dans une solution d'eau formolée.

La seconde étape se déroule en laboratoire. Les macro-invertébrés sont **identifiés** jusqu'au niveau taxonomique de l'espèce et comptés. Ils sont ensuite **classés dans des groupes** en fonction de leur utilité pour l'écosystème dont ils sont issus :

- Les prédateurs comme les arachnides et les chilopodes (milles pattes) assurent un contrôle biologique et l'équilibre des populations.
- Les décomposeurs comme les vers de terre et les diplopodes assurent le recyclage de la matière organique.
- Les ingénieurs de l'écosystème : fourmis et vers de terre anéciques et endogés jouent un rôle dans la structuration du sol par la bioturbation.
- Les phytophages comme les coléoptères adultes et les larves agissent sur la couverture végétale.

Les phytophages comme les coléoptères adultes et les larves agissent sur la couverture végétale.

Ces organismes participent activement au fonctionnement du sol en lui permettant de rendre un ensemble de **services écosystémiques** essentiels pour la planète tels que l'infiltration et le stockage d'eau, la séquestration de carbone, la stimulation de la croissance des plantes, le maintien de la biodiversité ou de l'activité microbienne, le recyclage de la matière organique. (Ruiz N 2011)

La méthode IndVal (Dufrene, M., Legendre, P 1997) permet d'identifier le macro-invertébré qui a une **valeur indicatrice significative**.

La formule utilité pour calculer l'BISQ est la suivante :

$$IBQS = \sum_{i=1}^n \ln(D_i+1) \times S_i$$

D_i est la densité moyenne de l'espèce i dans un site et S_i la valeur indicatrice du taxon.

- **Comment sont interprétées les valeurs du BISQ ?**

Cette formule intègre que le nombre d'espèces indicatrices et leurs densités diminuent avec la dégradation du milieu. L'évaluation faite par le BISQ peut être utilisée pour affecter **une note globale de qualité** au sol et le classer par rapport à un référentiel de départ ou bien pour faire une

interprétation de l'état écologique du sol grâce à l'analyse des espèces indicatrices présentes et leur mode de vie. Une **augmentation** de la note octroyée par l'indice indiquant **une amélioration** de la qualité du milieu. (Camacho et al. 2009) A contrario, **une diminution** de la valeur de l'BISQ indique **une dégradation** de la qualité du milieu.

2.2.4.2. L'indicateur de viabilité économique dans le modèle GAIASCOPE

Le revenu agricole dépend des choix des agriculteurs et des performances de leurs systèmes. Le statut économique de la ferme peut être positif ou négatif en fonction de l'utilisation d'intrants et de leur produit financier. Les agriculteurs doivent faire face à cette contrainte financière, en effet elle limite leurs choix de production. **La variable d'état économique** est le revenu cumulé, w représente la richesse déjà acquise par l'agriculteur et sa capacité à faire face aux contraintes financières actuelles et aux futures charges financières liées au cycle de production qui suit. Les gains de chaque cycle de production sont représentés par une fonction décrivant le bilan économique d'une culture. Cette fonction permet de décrire le bilan économique d'un cycle de production en fonction d'un choix de spéculation, de pratique et d'une certaine qualité de sol. Cette fonction est écrite de la façon suivante : $(n + 1) = (n) + (I(n), \sigma(n), \pi(n))$. Avec :

n : le cycle de production ℓ : la fonction des gains pendant un cycle de production, elle est fonction de La qualité de sol I , de la spéculation σ et du laps de temps π .

La contrainte économique qu'impose la notion de viabilité implique que le revenu cumulé $w(n)$ doit être positif ou nul à la fin des cycles de production sur la parcelle, c'est-à-dire au terme de la succession. Cette contrainte ne s'applique alors qu'au résultat final du cycle agricole (au bout des 40 ans), mais n'impose pas de contrainte sur l'état économique à l'intérieur de chaque cycle de production agricole. Cependant, il peut arriver que le revenu cumulé (w) au début d'une nouvelle culture ne suffise pas à couvrir les investissements nécessaires pour les premières étapes de la production. La période de croissance sans revenu, peut également être difficile économiquement. Ces situations peuvent entraîner des déficits durant les cycles agricoles. Certains agriculteurs ne peuvent pas se permettre de telles périodes de déficit. En effet, l'achat ou la location de terrains, entraîne des redevances qui doivent être payées chaque mois. Les périodes de déficits peuvent être problématiques aussi dans le cas où la main-d'œuvre non salariée d'une ferme familiale doit être payée. Le revenu mensuel de l'exploitation doit donc être garanti. C'est une contrainte supplémentaire

2.2.4. Analyse conceptuelle du modèle GAIA SCOPE

Un premier modèle conceptuel a été présenté en figure 4, nous allons voir en détail les fondements du modèle GAIA SCOPE grâce à la figure 5.

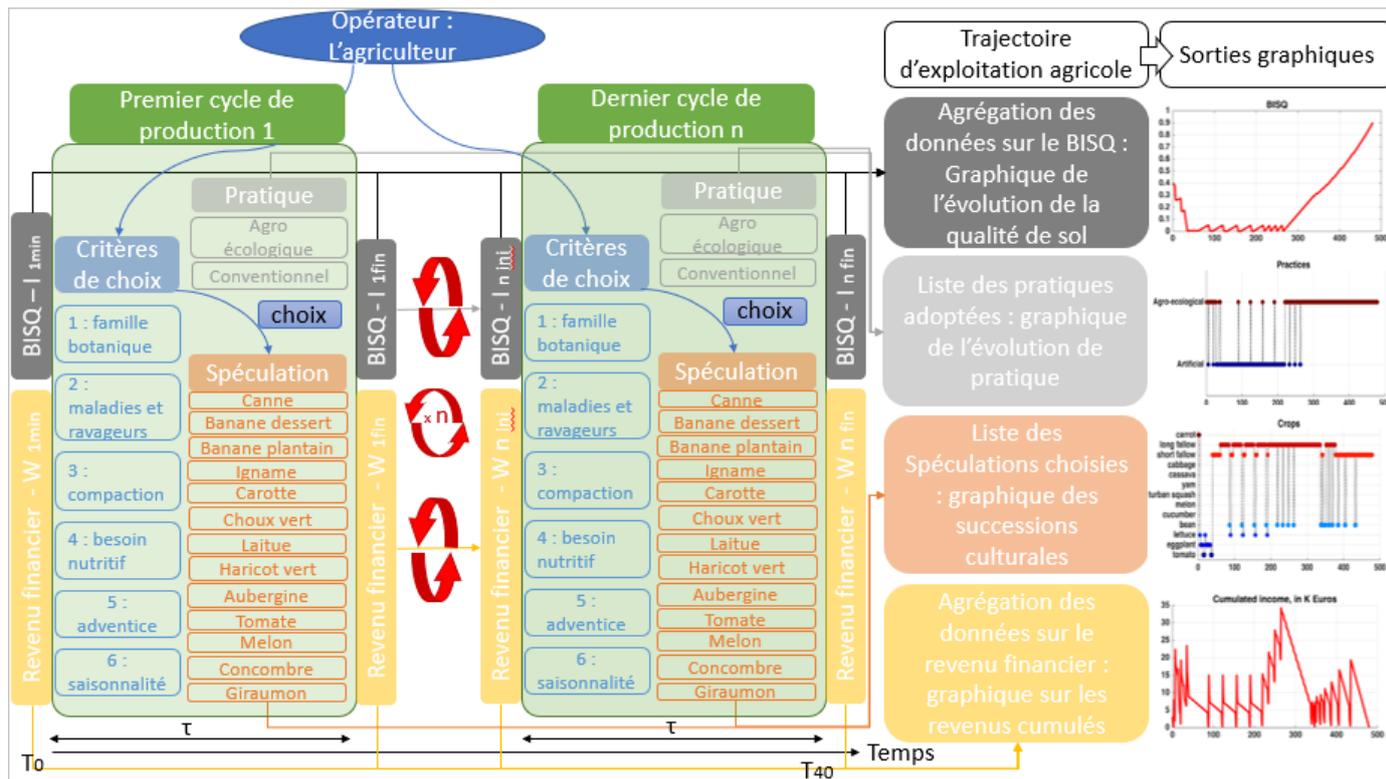


Figure 5 : schéma conceptuel du modèle GAIA SCOPE.

Légende :

- Système :

Cycle de production d'une spéculation qui a été choisie et associée à une pratique culturale.

Informations relatives aux pratiques de culture, deux modalités sont possibles : soit conventionnelle , soit agroécologique.

Informations relatives aux paramètres de choix pris en compte par l'opérateur pour le choix des successions de culture. Ces critères correspondent aux résultats de ce travail.

Informations relatives aux successions de cultures

- Environnement extérieur, relatif à l'environnement :

Information relative aux revenus financiers de l'agriculteur notés W.

Information relative à la qualité de sol avec des valeurs de BISQ notée I.

I → Temps en année

τ correspond à la durée d'une période de production, elle varie selon la spéculation choisie.

→ Flèche d'agrégation des informations, à chaque début et fin de période de production la valeur du BISQ est enregistrée et permet de faire un graphique de l'évolution du BISQ sur les 40ans de production. La valeur du BISQ en fin de cycle de production (I fini), correspond au BISQ en début de cycle de production suivant (I fini).

→ Flèche d'agrégation des informations relatives aux revenus cumulés de l'agriculteur, les revenus sont enregistrés à chaque début et fin de période de production sur les 40 ans. Cela permet de faire un

diagramme de l'évolution des revenus cumulés. La valeur du revenu financier en fin de cycle de production (W_{fin}) correspond au revenu financier en début de cycle suivant (W_{ini}) ;

→ Flèche d'action, l'agriculteur fait le choix de la spéculation en prenant en compte les critères agronomiques présentés en bleu.

→ Flèche relative à l'agrégation des informations relatives aux pratiques culturales associées à chaque cycle de production, une fois listée cela permet de faire le graphique de pratiques dans le temps.

→ Flèche relative à l'agrégation des informations relatives aux spéculations produites durant un cycle de production, une fois listée cela donne le graphique des successions de cultures sur 40ans.

0 Répétition du système de cycle de production autant de fois que cela est possible sur la période de 40ans.

Ce schéma conceptuel du fonctionnement du modèle en figure 5, présente le fonctionnement du modèle GAIA SCOPE est la position du travail présenté dans le cadre de ce mémoire. Le modèle GAIA SCOPE détermine des trajectoires d'exploitation agricole viable économiquement, qui améliore la qualité de sol entre l'état initial et l'état final sur une période de temps T pouvant aller jusqu'à 40 ans. C'est-à-dire :

$$I_{n\text{ fin}} - I_{1\text{ min}} \geq 0$$

Les choix agricoles effectués pendant la période considérée sont également influencés par des contraintes économiques :

$$w_{n\text{ fin}} - w_{1\text{ min}} \geq 0$$

On impose simplement une limite inférieure au revenu cumulé à chaque changement de culture. Ce qui signifie qu'une campagne agricole ne peut pas finir en déficit. Elle peut être négative lorsque certaines facilités de découvert sont autorisées par les banques pour une nouvelle campagne. A noter que, le choix particulier ou $w_{min} = -\infty$ conduit au cas où il n'y a pas de contraintes économiques dans le modèle. Cette formulation de modèle permet alors de traiter différents cas d'exploitation agricole. Un noyau de viabilité de trajectoire d'exploitation agricole est sélectionné à partir des conditions initiales et des contraintes du milieu que l'on fixe au modèle. Une trajectoire d'exploitation est proposée avec une succession de cultures parmi les spéculations disponibles sur une période fixée (qui peut aller jusqu'à 40ans). Le modèle associé à chaque période de production une pratique, soit agro écologique soit conventionnelle. La sortie finale du modèle, produit quatre graphiques, comme on peut le voir dans l'annexe 20.

2.2.5. Analyse agronomique du modèle Gaia Scope

Lorsque la parcelle est prête, toutes les cultures ne peuvent démarrer immédiatement car elles sont **saisonniers**. Pour déterminer le mois de l'année $\in \{1, 2, \dots, 12\}$ à partir de la date actuelle, il suffit de connaître un paramètre global: le mois à l'heure de début = 0. Nous supposons par la suite que le premier mois correspond à janvier. Connaître le mois calendaire, permet de définir les cultures pouvant être mises en place à la date de disponibilité de la parcelle. De même, certaines cultures ou pratiques peuvent ne pas être adaptées à une qualité de sol donné. Ces contraintes agronomiques sont prises en compte. Si nécessaire, une courte jachère, supposée n'avoir aucun impact sur la valeur BISQ, peut occuper la parcelle entre deux cycles de production pour assurer simultanéité entre la date de libération de la parcelle et la date de mise en culture de la spéculation suivante. (Durand et al. 2017)

L'objectif de ce travail est d'étendre les notions agronomiques qui seront ajoutées au modèle pour que les successions de cultures soient choisies sur des paramètres agronomiques autres que la saisonnalité des cultures, comme c'est actuellement le cas.

2.3 Problématique du stage et démarche adoptée.

Le modèle Gaia Scope dans l'état actuel d'avancement ne prend pas en compte de données agronomiques pour faire les choix de successions culturales. Les sorties du modèle sont quatre graphiques présentant la trajectoire **d'exploitation viable** (Voir figure 20) sur le laps de temps donné (40 ans) avec : la succession et les pratiques culturales adoptées, l'évolution de la qualité du sol et l'état économique de l'exploitation. La viabilité d'une trajectoire est déterminée en fonction en deux contraintes : la trajectoire d'exploitation doit permettre de maintenir ou d'améliorer l'indicateur biologique de qualité de sol (BISQ) et de maintenir ou augmenter les revenus cumulés de l'exploitation. Les successions de cultures proposées dans les trajectoires d'exploitation viable ne sont encadrées par **aucun critère de choix agronomique**, il est donc indispensable d'ajouter des règles de décisions qui permettront d'orienter les choix des successions culturales pour les rendre le plus agronomiquement cohérent. La problématique de ce travail est donc, de savoir, **comment rendre le modèle GAIA SCOPE agronomiquement cohérent et représentatif de l'agriculture guadeloupéenne ?**

Pour répondre à cette problématique nous nous baserons sur les grands principes agronomiques qui régissent le choix des successions culturales (voir état de l'art sur les successions de culture). Nous proposerons plusieurs **règles de décisions** et des ajouts d'informations relatives aux caractéristiques agronomiques des spéculations. Chaque critère de choix sera présenté. Ensuite un **arbre de décision final** sera réalisé, permettant de comprendre le raisonnement global du choix de la succession de cultures. Enfin, pour finir une **vérification** des règles de décision par une mise à l'épreuve de celles-ci proposé sur 6 situations de production présentées dans la publication (Durand et al. 2017).

3) Matériel et méthodes

3.1. Matériel

Ce travail se base sur la publication fondatrice du modèle : Durand et al : « Agroecological transition : A viability model to assess soil restoration: Natural Resource Modeling » publiée en 2015. Cette publication présente le modèle GAIA SCOPE. Six études de cas sont présentées dans cet article. Le modèle est utilisé sur chaque étude de cas et simule une rotation sous la forme de sorties graphiques. Chaque sortie représente un type d'exploitation particulière et permet de dégager une trajectoire d'exploitation viable à partir d'une situation initiale décrite. (Voir annexe 20)



Figure 6 : Matériel utilisé en fonction des étapes de travail

D'autre part, ce travail se base sur la construction de règles de décisions agronomiques s'appuyant sur des recherches bibliographiques conséquentes. 162 références bibliographiques composées de livres d'agronomie générale, d'articles et publications de recherches, de fiches d'instituts techniques, de thèses, de mémoires et de rapports...et de consultation d'experts de l'INRA Antilles-Guyane, de Guadeloupe. Voir figure 6 et annexes 12 et 14 qui renvoient aux références bibliographiques, des références sont également présentes dans le corps du texte de ce travail.

3.2. Méthode

Dans cette partie nous allons d'abord décrire la démarche que nous avons adoptée pour répondre à la problématique. Nous présenterons ensuite la méthode de réalisation de chaque critère de choix. Pour finir nous détaillerons la méthode de validation des règles de décision par confrontation au modèle GAIA SCOPE.

3.2.1 Méthode générale

L'objectif de ce travail est de rendre agronomiquement cohérent les successions de cultures proposées en sortie graphique du modèle GAIA SCOPE. Pour optimiser les successions de culture nous ferons en sorte que la future culture soit la mieux adaptée aux conditions du milieu que la précédente a laissé. Nous nous demandons quelles sont les modifications du milieu que la culture impose et comment cela influence le choix de la culture suivante. Le milieu : le sol, l'eau et l'air sont les éléments de continuité spatio-temporelle entre les spéculations d'une succession culturale. Nous étudions le cas de l'agriculture en plein champs, dans le cadre de ce travail nous faisons donc les hypothèses suivantes :

H1- Le sol est l'élément qui fait le lien entre deux cultures. Il sera le témoin et la mémoire des pratiques culturales.

H2- Les résidus de culture laissés sur la parcelle sont également un des liens entre la culture précédente et la suivante.

H3- Chaque spéculation a des besoins spécifiques en ce qui concerne la compaction du sol pour le développement racinaire et la nutrition de la plante. D'autre part la plante impacte le milieu dans lequel elle évolue en modifiant les propriétés physico chimiques du sol et en favorisant le développement de certains types de maladie ou ravageurs

H4- Les spéculations appartenant aux mêmes familles botaniques partagent des caractéristiques physiologiques communes, de fait elles ont des besoins proches.

H5- La saisonnalité des cultures doit être respectée pour déterminer la date de mise en culture de celles-ci.

Nous nous intéresserons dans ce travail aux effets des cultures sur les ressources du milieu et en quoi ces effets jouent un rôle pour le choix de la culture suivante. A partir des hypothèses formulées nous avons identifié **les thématiques** à partir desquelles nous formulerons des critères de choix permettant d'encadrer les **choix de succession de culture** :

1- L'appartenance des spéculations à des **familles botaniques** et l'importance de la diversification des cultures dans une succession (critère de choix n°1 de la figure 7).

2- Les **maladies et ravageurs** partagés par les spéculations. Le concept étant d'éviter de faire se succéder deux spéculations ayant un grand nombre de Maladies et Ravageurs (MR) en commun. (Critère de choix n° 2 voir la figure 7).

3- Nous nous intéressons à la composition chimique du sol en **éléments minéraux** : Azote, Phosphore, Potassium et matière organique. Nous proposons d'étendre l'évaluation de la qualité du sol à la richesse en éléments minéraux : essentiels à la croissance des cultures (critère de choix n° 3 voir la figure 7),

4- **L'état de compacité** et de porosité du sol nécessaire à l'implantation d'une nouvelle culture et celle induite par la prospection racinaire (critère de choix n° 4 voir la figure 7).

5- La **saisonnalité des cultures** pour l'implantation d'une culture à une date donnée (critère de choix n°5 voir la figure 7).

A partir de cette réflexion nous avons réalisé des critères de choix permettant de clarifier agronomiquement les choix de successions faite par le modèle GAIA SCOPE.

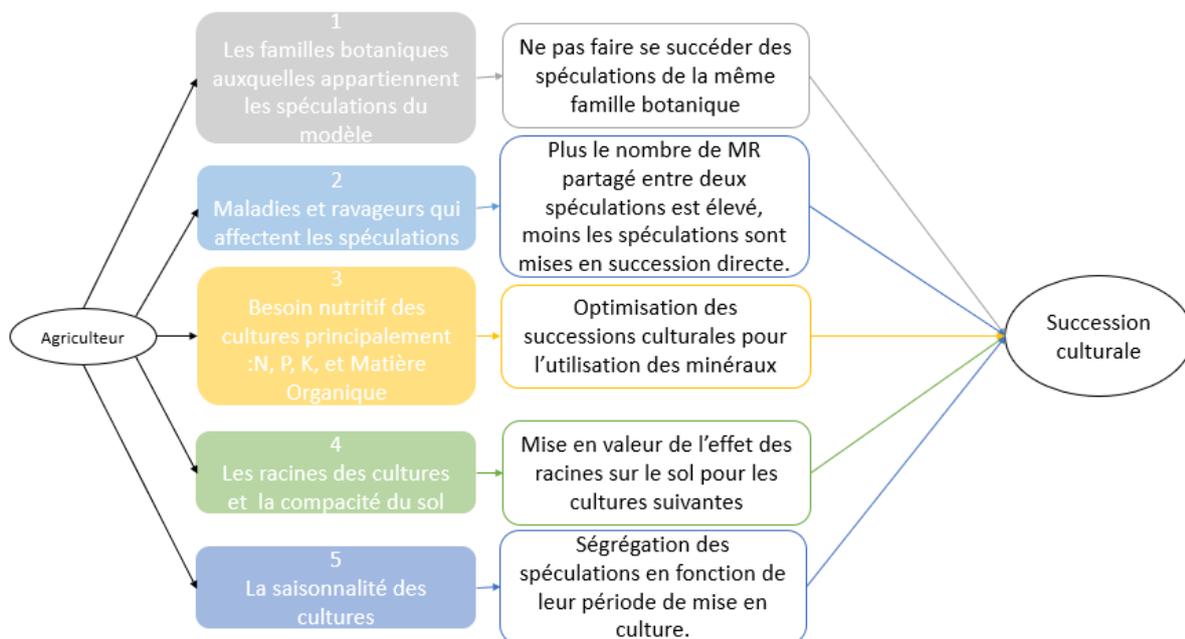


Figure 7 : Schéma de l'ensemble des règles de décision agronomique prise par l'agriculteur pour raisonner les successions de cultures du modèle GAIA SCOPE.

3.2.2 Méthode de réalisation de chacun des critères de choix de succession culturale

3.2.2.1 *Compatibilité des familles botaniques auxquelles appartiennent les cultures dans les successions culturales*

Un des premiers principes agronomiques est de diversifier les cultures dans les successions culturales et ainsi d'éviter de faire se succéder deux cultures appartenant à la même famille botanique (Chambre d'Agriculture d'Aquitaine 2016), (N. Munier-Jolain et al 2008). En effet des cultures de même famille botanique partagent des caractéristiques botaniques et agronomiques, elles sont souvent touchées par les mêmes maladies et puisent les mêmes ressources du sol. En effet le fait de faire se succéder des spéculations de même famille botanique accentue la « fatigue des sols » (Charles-Marie Messian 1997). Ce terme est surtout utilisé pour les cultures maraichères et vivrières. « Il est bien difficile dans les vieux sols maraichers où les récoltes deviennent insuffisantes, de faire la part des facteurs concernant la baisse de rendement : maladies spécifiques, ou parasites de faiblesse devenant nocifs par accumulation. Ces divers parasites sont d'ailleurs reliés les uns aux autres par des relations complexes : nématodes favorisant la pénétration des *Fusarium* vasculaires, champignons du sol aggravant les dégâts de *Meloidogyne* ou de *Plasmodiophora* par pourriture des gales, etc... La « fatigue » du sol est donc un phénomène complexe. » (Charles-Marie Messian 1997)

Ce premier critère de choix concerne les familles botaniques auxquelles appartiennent les spéculations que l'on souhaite mettre en succession dans le modèle. A la fin d'un cycle de production d'une certaine culture dont on connaît la famille botanique, nous interrogeons le choix de la spéculation suivante de telle sorte que celle-ci n'appartienne pas à la même famille botanique.

3.2.2.2 *Maladies et ravageurs commune aux couples de spéculations.*

La mise en place de successions culturales doit être réfléchi en termes des foyers de maladies et ravageurs. En effet, dans le but de limiter la propagation des maladies et ravageurs (MR) des cultures, les successions culturales diversifiées sont un levier d'action intéressant. (N. Munier-Jolain, V. Deytieux, J.P. Guillemin, S. Granger, S. Gaba 2008). Ce critère de choix, à la différence de la différence de celui relative aux familles botaniques, va permettre de mettre en évidence les MR partagés par tous les types de spéculations deux à deux. Ainsi il sera possible de mettre en évidence les MR partagés entre deux spéculations n'appartenant pas aux mêmes familles. En effet **nous supposons que certaines spéculations n'appartenant pas aux mêmes familles botaniques peuvent partager un grand nombre de MR. La succession directe de ces spéculations n'est donc pas bénéfique pour l'agriculteur.**

Lorsqu'un pathogène peut se transmettre d'une culture à la suivante sans que son cycle de développement soit stoppé, cela devient un foyer de propagation du pathogène. Pour limiter la formation de foyer de maladies et ravageurs il faut favoriser la diversité des spéculations qui ne sont pas touchées par les mêmes pathogènes. En effet, le maintien d'une pression acceptable et maîtrisable sur les cultures est essentiel. Une pression des pathogènes, acceptable pour l'agriculteur, doit permettre à l'exploitant de pérenniser son activité dans le temps. Il faut que la production soit suffisante en termes de qualité et de quantité, que les pratiques de lutte soient réalisables, que ce soit avec des pratiques conventionnelles et l'utilisation de produits phytosanitaires ou avec des pratiques agroécologiques et des pratiques alternatives.

Nous réalisons ce critère de choix relatif aux maladies et ravageurs touchant les 13 spéculations du modèle que nous étudions en deux étapes clef.

1- La première étape est un inventaire le plus exhaustif possible des maladies fongiques, des maladies bactériennes, des maladies virales et des ravageurs touchant chaque spéculation. Cet inventaire a été fait à partir de recherches bibliographiques sur des documents techniques provenant des Antilles françaises, principalement de la Guadeloupe et de la Martinique. Les références bibliographiques à partir desquelles ont été faites les critères de choix sont résumées dans l'annexe 12. Une fois les MR inventoriés grâce aux recherches bibliographiques, des acteurs ont été sollicités pour confirmer la

présence de ces MR sur le territoire guadeloupéen et le niveau d'affection des spéculations. Les acteurs qui ont participé, sont détaillés dans l'annexe 12. Trois niveaux d'affections des MR ont été déterminés à partir de dires d'experts : la spéculation n'est pas concernée par la MR, soit elle est faiblement touchée ou bien l'impact de la maladie n'entraîne pas de baisse de rendement significatif par rapport à l'activité de l'agriculteur, soit la spéculation est touchée. Les résultats de ces recherches sont résumés sous forme de 4 tableaux à double entrée (1 sur les maladies fongiques, 1 sur les maladies bactériennes, 1 sur les maladies virales et 1 sur les ravageurs). Les lignes correspondent aux 13 spéculations du modèle. En colonne sont inventoriés les MR touchant les spéculations en Guadeloupe.

2-Sont ensuite évalués les couples de spéculation deux à deux pour comptabiliser indépendamment le nombre de Maladies fongiques, bactériennes, virales et de Ravageurs qu'ils ont en commun. Le tableau final fait la somme des 4 tableaux et permet de connaître le nombre de MR partagé par chaque couple de spéculation.

Ainsi le critère de choix énoncé permet d'interroger le choix de la culture suivante à la fin d'un premier cycle de production de telle sorte que la culture suivante partage un faible nombre de MR avec la culture précédente.

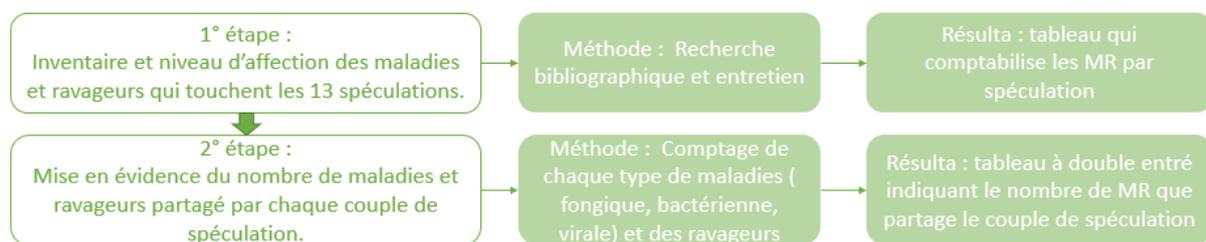


Figure 8 : Les étapes de la méthode pour le comptage des MR par couple de spéculation

3.2.2.4 Les propriétés chimiques du sol, les impacts et besoins des cultures en éléments minéraux

Nous nous intéressons dans cette partie à la composition chimique du sol en éléments minéraux utiles pour la croissance des cultures. Les plantes, pour leur développement, ont besoin d'énergie lumineuse, d'oxygène, de gaz carbonique, d'eau et d'éléments minéraux. La plante prélève les éléments minéraux du sol grâce à ses racines, le sol joue le rôle de « garde-manger » plus ou moins grand et plus ou moins rempli. (Groupe de recherche et d'échanges technologiques, CIRAD, et Ministère des affaires étrangères 2009). Les principaux éléments minéraux nécessaires au développement des cultures sont : l'azote (N), le Phosphate (P) et Potassium (K), à ces trois éléments peut s'ajouter le Calcium (Ca) et le Magnésium (Mg). Chaque spéculation a des besoins spécifiques en éléments minéraux. Ce sont ces besoins spécifiques que nous souhaitons mettre en évidence grâce à ce critère de choix. Pour cela nous allons procéder de la façon suivante. Dans un premier temps, les fiches techniques de chaque spéculation nous permettent de mettre en évidence les besoins spécifiques de chaque spéculation pour les principaux éléments minéraux du sol (N,P et K). A partir de ces informations, nous proposerons de mettre en évidence les cultures qui prélèvent les mêmes éléments du sol dans les mêmes quantités. Le raisonnement pour ce critère de choix est d'éviter de faire se succéder des spéculations prélevant les mêmes quantités d'éléments minéraux du sol. Pour éviter l'épuisement des ressources et l'utilisation d'engrais inutiles, il est plus judicieux de raisonner les successions de culture en fonction de leurs besoins en éléments minéraux.

D'autre part la matière Organique (MO) présente dans le sol joue un rôle important pour la structure du sol, mais aussi pour la nutrition des plantes. Il est donc important de raisonner les successions de cultures sur ce paramètre. La matière organique provient de la décomposition de matières vivantes, animale ou végétale. Les résidus de cultures sont des apports importants de MO.

Dans le but de pouvoir hiérarchiser les besoins de chaque culture en éléments minéraux, nous allons effectuer une échelle de besoin à trois niveaux d'exigence pour chaque élément minéral : forte, moyenne et faible demande. L'échelle est effectuée de la façon suivante : on calcule l'intervalle entre le plus élevé et le plus faible besoin en élément minéral, puis on divise par trois, pour avoir la valeur des trois niveaux. (Les calculs sont explicités en annexe 9). Les besoins en éléments minéraux en début de culture sont exprimés en unité par kilogramme.

Nous allons ensuite faire un tableau à double entrée pour confronter deux à deux les spéculations qui peuvent se suivre (comme pour le tableau des MR). La hiérarchisation des successions se fait en fonction du besoin en élément minéral. Le raisonnement est le suivant. Plus la valeur attribuée est élevée, plus le couple de spéculation prélève les mêmes éléments du milieu. Alors que plus le score est faible plus le couple de spéculation est complémentaire car ils ne prélèvent pas les mêmes éléments minéraux. L'échelle est la suivante.

Forte / Faible : 0	Faible / Forte : 0	Moyenne / Forte : 1
Forte / Moyenne : 1	Faible / Moyenne : 0	Moyenne / Moyenne : 1
Forte / Forte : 2	Faible / Faible : 0	Moyenne / Faible : 0

Cette notation permettant de hiérarchiser les successions de cultures deux à deux au regard des trois éléments minéraux pris individuellement. Cela permet donc d'obtenir un tableau de hiérarchisation pour chaque élément chimique. Les trois tableaux sont ensuite fusionnés en un seul. Les valeurs de chaque case sont sommées avec les cases correspondantes dans les trois tableaux. Cela permet d'avoir une hiérarchie des successions en fonction de leurs besoins en éléments minéraux N, P et K. En sommant le tableau correspondant aux besoins en azote avec celui des besoins en Phosphore, puis avec celui des besoins en potassium. Nous supposons que les trois éléments minéraux ont la même importance pour la croissance de la plante.

Les valeurs les plus élevées dans ce tableau correspondent aux couples de spéculation qui ont les exigences en éléments minéraux les plus semblables. Il faut donc éviter de mettre ces deux spéculations l'une à la suite de l'autre dans une succession de culture. Les couples de spéculation avec les scores les plus élevés risquent de provoquer une fatigue du sol car elles prélèvent les mêmes proportions d'éléments minéraux. Au contraire des couples qui totalisent un score faible ont en proportion des besoins en éléments minéraux différents et donc complémentaires. Il est de ce fait, plus intéressant de privilégier ces couples de spéculation pour les successions de cultures.

3.2.2.4.1 Les résidus de cultures et la matière organique

Les résidus de cultures sont une source de matière organique pour la parcelle. Les rôles de la matière organique sont les suivants :

- Une bonne structure de sol avec des agrégats stables propices au développement racinaire des cultures.
- Protection contre l'érosion, par la stabilisation des agrégats qui sont moins sujets au ruissèlement.
- Rétention d'eau et drainage, la matière organique agit comme une éponge.
- C'est une réserve en éléments nutritifs, la décomposition de la matière organique peut libérer de l'azote et d'autres éléments minéraux et augmente la capacité d'échange cationique (CEC).

Nous allons voir dans cette partie la quantité de matière organique laissée à la parcelle par les résidus de culture de chaque spéculation (pailles, chaumes, feuilles, racines). Ce sont des produits organiques non transformés, caractérisés par une plus faible quantité de carbone stable par rapport aux produits organiques évolués (boue, fumier, déchet urbain, résidus des industries agroalimentaires). Ces

différents produits présentent un rendement en humus variable (mesuré par un coefficient k_1 appelé coefficient iso humique). La dégradation de la Mo fait intervenir des organismes décomposeurs. Selon le rapport C/N du sol, les microorganismes peuvent absorber l'azote pour dégrader la Mo et créer un phénomène de « faim d'azote » induisant une compétition pour l'azote entre les microorganismes décomposeurs et les cultures. Dans les sols cultivés le rapport C/N est proche de 10. C'est un indicateur de qualité de sol, il faut que ce rapport reste proche de la valeur 10 pour ne pas créer de déséquilibre. Pour effectuer un bilan humique d'une parcelle il faut qualifier les entrées et les sorties, l'équation est la suivante : $S = K_1 \times A - K_2 \times B$.

S : stock de mo. K_1 : coefficient iso humique. K_2 : coefficient de minéralisation du sol.

B : perte de MO A : quantité de mo enfouis.

Nous quantifions à partir de recherches bibliographiques, la masse sèche ou fraîche de résidus par spéculation. Les informations disponibles dans la littérature technique sont disparates en fonction des cultures. Cela nous permet de hiérarchiser les cultures en fonction de l'importance de leur apport en mo au bout d'un cycle de production.

3.2.2.3 Impact de la prospection racinaire des cultures sur les propriétés physiques du sol : état de compaction.

Le sol est composé de trois phases : solide, liquide et gazeuse, qui s'agencent sous une certaine organisation selon les situations et les types de sol. Pour caractériser ces différentes organisations, le sol est défini par plusieurs caractéristiques :

- La texture qui correspond au pourcentage de particule de limon, argile et sable qui sont les constituants fins à la différence des éléments grossiers (gravier, cailloux, pierre, block).
- La structure de l'horizon de sol : c'est le modèle d'arrangement des différentes particules solides du sol et la conséquence de cet assemblage. C'est de cette structure que va dépendre **la porosité** et **la compacité** de la structure. Cela va dépendre de la facilité avec laquelle les **racines des cultures vont pouvoir prospecter** la colonne de sol.

Les facteurs qui affectent la structure du sol sont multiples. Ils sont d'origine pédologique avec l'effet des ions sur le ciment colloïdal, l'effet de la matière organique qui par sa composition chimique riche en groupement OH va jouer le rôle de ciment des agrégats organo- minéraux de grandes dimensions. La matière organique permet de stabiliser la structure si elle est renouvelée au même rythme que sa biodégradation.

- Le **climat** joue également un rôle dans la structuration du sol. Les alternances de sécheresse et d'humidité, le gel et l'impact des gouttes d'eau qui tombent au sol sont autant d'évènements climatiques qui structurent le sol.
- Les éléments **anthropiques** jouent aussi un rôle sur la structure du sol. Le travail mécanique comme le labour, les travaux superficiels ou en profondeur et les travaux de brise mottes sont des pratiques qui perturbent la structure naturelle du sol. Le passage des machines sur un sol humide peut provoquer la compaction des horizons et la diminution de la porosité.
- Enfin, des **facteurs biologiques** tels que les microorganismes, la faune et **les racines** jouent un rôle important dans la construction de la structure du sol. (Massenet Jean Yves 2012)

Dans le cadre du modèle GAIA SCOPE les caractéristiques environnementales ne sont pas prises en compte, les trajectoires d'exploitation ne sont pas géolocalisées sur un endroit précis du territoire, dans des conditions environnementales précises. Nous n'avons donc pas axé aux conditions climatiques du milieu. Les éléments d'origine anthropique comme les pratiques culturales sont pris en compte et paramétrés de telle sorte que des pratiques agroécologiques améliorent la qualité de sol, alors que des pratiques dites conventionnelles la dégradent. Il reste donc les effets biologiques. Pour ce critère de

choix, nous nous intéresserons plus particulièrement aux **effets que peuvent avoir les racines sur la structure du sol**.

L'enjeu de ce critère de choix est d'identifier les effets de chaque culture sur l'état de compaction du sol. Selon (Chen et Weil 2010), les racines, principalement pivotantes, permettent de décompacter le sol. La morphologie des racines est responsable des effets que celle-ci ont sur l'état de compaction du sol. Les racines peuvent être soit Pivotantes⁴, Fasciculées⁵ ou traçantes⁶. Leurs profondeurs d'enracinement dépendent du type de culture, mais aussi des conditions du milieu. (Benadjaoud A. 2015).

Etant donné que l'état physique du sol après la culture devient, l'état initial du cycle cultural suivant, nous nous intéressons pour ce critère de choix aux **effets de décompaction du sol opéré par les racines** des cultures implantées et aux besoins des cultures suivantes. Nous ferons en sorte d'optimiser l'adéquation entre, les besoins des cultures suivantes par rapport aux impacts qu'a eu la culture précédente sur l'état de compaction du sol. Pour cela nous nous appuyerons sur de la bibliographie de documents techniques de la chambre d'agriculture, notamment pour connaître les recommandations de travail du sol à chaque spéculation. Nous proposons un tableau classifiant les spéculations en fonction de leurs architectures racinaires et de la profondeur d'enracinement. Plus la profondeur d'enracinement est importante plus l'effet décompactant est fort. Les racines pivotantes ont également un effet plus important.

Les références bibliographiques pour la réalisation de ce tableau sont présentées dans l'annexe 15, d'autres paramètres d'avantage d'information sont disponibles en annexe 19.

A partir du tableau 6 nous pouvons identifier quelles spéculations ont un effet décompactant. Elles seront privilégiées et mises en précédant d'une culture qui a besoin d'un sol bien décompacté. Pour cela nous devons identifier les besoins de chaque culture au moment de leur implantation à la parcelle. Nous allons faire un tableau à double entrée avec pour chaque spéculation les exigences de travail du sol nécessaires. Nous nous baserons sur les données de fiches techniques de la chambre d'agriculture et de l'institut technique de la Martinique.

Nous croiserons ensuite les données des deux tableaux. Nous ferons correspondre les cultures qui ont tendance à décompacter le sol en fin de cycle de production avec les spéculations qui ont des besoins de sol bien décompacté pour leur implantation sur la parcelle. Inversement, les spéculations qui ont moins tendance à décompacter le sol à la fin de leur cycle de production seront mises en succession avec une culture qui n'a pas besoin d'un sol fortement décompacté pour sa mise en culture. Le résultat final sera présenté sous forme de schéma en figure 11.

3.2.2.5 La saisonnalité des cultures

Dans une succession de cultures, il faut raisonner l'agencement des cultures en fonction de la saisonnalité de celle-ci. Les cultures peuvent être plantées à une certaine période de l'année et non à une autre. Certains agriculteurs peuvent avoir une stratégie différente, qui consiste à effectuer une

⁴ Les racines pivotantes : la racine principale est beaucoup plus importante que les racines secondaires. Les racines pivotantes s'enfoncent en général très profondément dans le sol verticalement et fixent solidement la plante.

⁵ Les racines fasciculées Ce système racinaire est formé d'un fin chevelu de racines entre lesquelles il est impossible de distinguer la racine principale des racines secondaires.

⁶ Les racines traçantes : Racine superficielle qui peut s'étendre loin du pied dont elle est issue.

mise en culture tardive ou précoce pour apporter sur le marché des spéculations qui pourront être plus fortement valorisées, car l'offre sera faible et la demande importante au moment où la culture est prête à être commercialisée. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux périodes de culture « classique » dans les Antilles françaises, dictées par les contraintes agronomiques de besoins de cultures. En effet, chaque plante a des besoins climatiques spécifiques en ensoleillement, chaleur et hygrométrie, qui correspondent à une période de l'année. Nous nous baserons sur des données issues de la chambre d'agriculture de Martinique pour effectuer un tableau indiquant les **périodes de la mise en culture** de chaque spéculation. Avant la mise en culture, il est nécessaire de réserver une certaine période de temps pour **la préparation de la parcelle**, en vue de la mise en culture. En effet, il n'est pas réaliste de faire se succéder deux spéculations, en prenant comme date de semis de la culture suivante, la date de récolte de la culture précédente. L'enfouissement des résidus, un travail du sol plus ou moins superficiel pour préparer le lit de semence, est nécessaire pour la mise en culture de la spéculation suivante.

Nous calculerons le temps nécessaire à la suite de la culture de chaque spéculation pour avoir une parcelle prête à être plantée. Etant donné la diversité des successions possibles, nous ferons la moyenne de ce temps de travail et l'appliquerons à chaque début de mise en culture. Les trajectoires d'exploitation étant calculées sur 40 ans, l'approximation du temps de préparation du sol pour la culture suivante semble être pertinente.

Ce critère de choix permettra donc de faire un calendrier de mise en culture pour chaque spéculation du modèle. Au mois de l'année pour lequel la parcelle est laissée libre par la culture précédente, nous serons en capacité d'effectuer une liste de spéculations potentiellement cultivables à cette période.

3.2.3 Démarche d'évaluation des règles de décisions

Le matériel utilisé pour effectuer la validation des règles de décision est la publication de Durand et al, 2017, six études de cas y sont étudiées. Les 6 sorties graphiques issues de la publication représentent des situations initiales différentes, nous conserverons ces mêmes situations initiales pour tester les règles de décision. Pour cela nous procédons par étapes :

1- Critique agronomique des successions de cultures proposée par le modèle GAIA SCOPE : Une critique agronomique est faite pour chacune des 6 études de cas de la publication. Pour chaque étude de cas nous mettrons en application la même méthode de critique. A chaque fin de cycle de production et implantation de la culture suivante, nous questionnons le couple de spéculation (précédant/ suivant cultural) à travers les règles de décision agronomique. Nous utiliserons le tableau final figure 12. Remarque : La critère de choix relatif à la saisonnalité des cultures ne peut pas être mis en application dans cette étape car graphiquement il n'est pas possible d'identifier le mois de l'année pendant lequel se fait l'implantation de la nouvelle culture.

Soit aucun critère de choix ne déconseille la succession culturale proposée par le modèle. Cela signifie qu'elle peut être laissée telle quelle, elle est agronomiquement cohérente au regard des règles de décision proposée.

Soit une des règles de décision interdit ou n'est pas favorable au choix du suivant qui est proposé par le modèle. Nous proposons alors une nouvelle succession de culture.

2- Proposer des successions agronomiquement idéales : Une fois que nous avons identifié quelles successions de cultures ne sont pas favorables d'après les règles de décision. Nous proposons une nouvelle succession de culture qui réponde le plus positivement possible à l'arbre de décision des critères de choix agronomiques. (Figure 10). Nous conservons les mêmes pratiques que celles observées dans les sorties graphiques de la publication. Nous faisons ce choix pour ne faire varier qu'un un seul paramètre, et observer l'effet des nouvelles propositions de succession. Si nous changeons plusieurs paramètres (les pratiques et les successions) nous obtiendrons l'effet cumulé des

deux modifications et nous ne serons pas en capacité d'évaluer les effets qu'ont eu les modifications de succession de culture.

3- Evaluation de l'impact des nouvelles propositions de succession sur la qualité de sol et les revenus cumulés : Un script Matlab (source Dessilles Anya, voir annexe 22). Évalue la viabilité (adéquation entre amélioration de la qualité du sol et revenus obtenus par l'agriculteur) des trajectoires d'exploitations nouvellement proposées. Le script permet d'obtenir le même type de sortie graphique que celle obtenue dans les figures de la publication Durand et al., 2015. Les graphiques sur l'évolution du BISQ et des revenus cumulés permettent d'évaluer les trajectoires sur la base d'une comparaison des anciennes et des nouvelles trajectoires. Pour cela nous comparons les valeurs finales obtenues en fin de trajectoire, les valeurs maximales et minimales et l'allure générale des courbes. Une critique des résultats obtenus sera faite dans la partie discussion.

4) Résultats

4.1. Critère de choix n°1 : Compatibilité des familles botaniques auxquelles appartiennent les cultures dans les successions culturales

Tableau 2 : Les familles botaniques auxquelles appartiennent les spéculations du modèle GAIA. SCOPE.

	Poacée	Musacée	Dioscoréacée	Ombellifère	Fabacée	Astéracée	Crucifère	Solanacée	Cucurbitacée
Canne									
Banane P									
Banane D									
Igname									
Carotte									
Haricot V									
Laitue									
Choux V									
Aubergine									
Tomate									
Melon									
Concombre									
Giraumon									

Ce tableau permet de mettre en évidence les spéculations appartenant aux mêmes familles botaniques. Ainsi on note que : la banane plantain et la banane dessert d'exportation Cavendish appartiennent toutes les deux à la famille des musacées, l'aubergine et la tomate sont des solanacées et enfin le melon, le concombre et le giraumon sont des cucurbitacées.

Pour intégrer la nécessaire diversification des successions, le modèle devra éviter la possibilité de faire se succéder deux spéculations de la même famille botanique. Pour les cultures pérennes comme la banane et la canne à sucre nous prenons en compte un cycle de production entier, de sa mise en culture jusqu'à la dernière récolte avant l'arrachage de la culture. Les durées de cycle de production par cultures sont présentées en annexe 10.

Si de nouvelles spéculations sont ajoutées, les règles de décision devront être mises à jour. Si une nouvelle spéculation appartient à l'une des familles botaniques déjà présente il suffira de l'ajouter à la colonne correspondant à sa famille. Si la nouvelle spéculation appartient à une famille différente, non encore répertoriée, il faudra créer une nouvelle modalité de famille botanique.

Rédaction du critère de choix :

Dans le but de diversifier les cultures mises en place dans les successions culturales comme évoqué précédemment : deux spéculations de la même famille botanique ne se succèdent pas directement. (Voir figure 9). Au moins une culture d'une autre famille botanique doit être intercalée entre la récolte et le semis de deux cultures de la même famille botanique. A fortiori si ce sont deux spéculations identiques. La même idée est reprise dans la figure 9.

Le raisonnement est fait à l'échelle des cycles de productions et non de l'année. La durée de chaque cycle de production varie en fonction des spéculations (Voir annexe 7). Par exemple le cycle de production d'une banane dessert est de 60 mois alors que celle d'une production de carotte est de 4 mois.

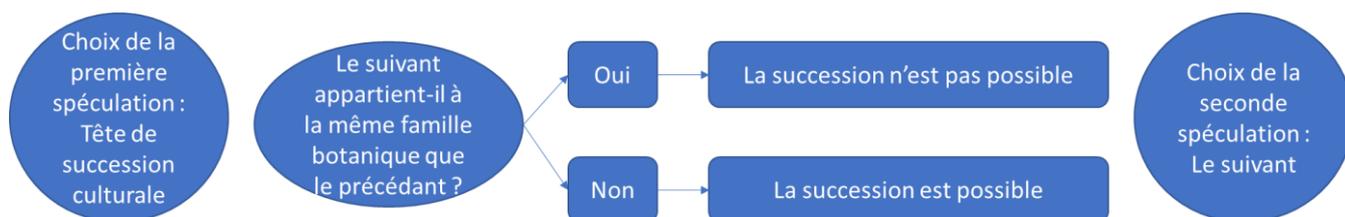


Figure 9 : Arbre de décision pour le choix du suivant à la fin d'un cycle de production.

4.2. Critère de choix n°2 : Maladies et ravageurs communs aux couples de spéculations.

Tableau 3 : Nombre des maladies et ravageurs partagé par les couples de spéculations présentés en lignes et en colonnes.

	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Lautue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
canne				1		2		3	1	2	2	1	4
banane P			4	1		1			1	1	1		
Banane D		4		1		1			1	1	1		
Igname	1	1	1		1				1				
Carotte				1		4	2	1			1	1	1
Haricot V	2	1	1		4		1	3	1	2	3	1	3
Lautue					2	1				1	1		
Choux V	3				1	3			1	3	3	2	5
Aubergine	1	1	1	1		1		1		4	1		1
Tomate	2	1	1			2	1	3	4		2		2
Melon	2	1	1		1	3	1	3	1	2			4
Concombre	1				1	1		2			3		3
Giraumon	4				1	3		5	1	2	4	3	

Légende :

0	Neutre	2	Défavorable	4	Fortement défavorable
1	Moyennement défavorable	3	Très défavorable	5	Extrêmement défavorable

Ce tableau permet de comptabiliser le nombre total de MR commun à chaque couple de spéculation et de connaître l'appréciation à être mis en succession.

On remarque que les couples qui partagent le nombre de MR le plus élevé appartiennent en général à la même famille botanique, cela confirme les observations faites dans le premier critère de choix relatif aux familles botaniques.

En effet les couples : Banane Plantain/Banane Dessert qui appartiennent toutes les deux à la famille des Musacéa partagent quatre MR. Il en est de même pour la famille des Cucurbitacées : Melon/Giraumon partagent quatre MR. Les deux autres couples composant la famille des cucurbitacées : Melon/concombre et Concombre/Giraumon partagent trois MR.

A partir de cette classification des couples de spéculation en fonction du nombre de MR partagé, nous pouvons effectuer une hiérarchisation des successions culturales plus ou moins judicieuse.

Plus le nombre de MR est élevé, plus les deux spéculations mises en succession ont des risques de se transmettre les MR qu'ils possèdent en commun. Les agriculteurs essaient donc le plus possible de

faire se succéder des spéculations dont le nombre de MR qu'ils partagent est faible, ou nul dans l'idéal.

Rédaction du critère de choix :

Une échelle d'appréciation dégressive :

Plus le nombre de MR est élevé plus le couple de spéculations est noté négativement, alors la spéculation en question sera fortement défavorisée par le modèle dans le choix de la succession culturale.

Au contraire, plus le nombre de MR est faible (proche de zéro), plus la spéculation est notée positivement, alors la spéculation en question sera fortement favorisée par le modèle dans le choix de la succession culturale. (Voir figure 20 et 21)

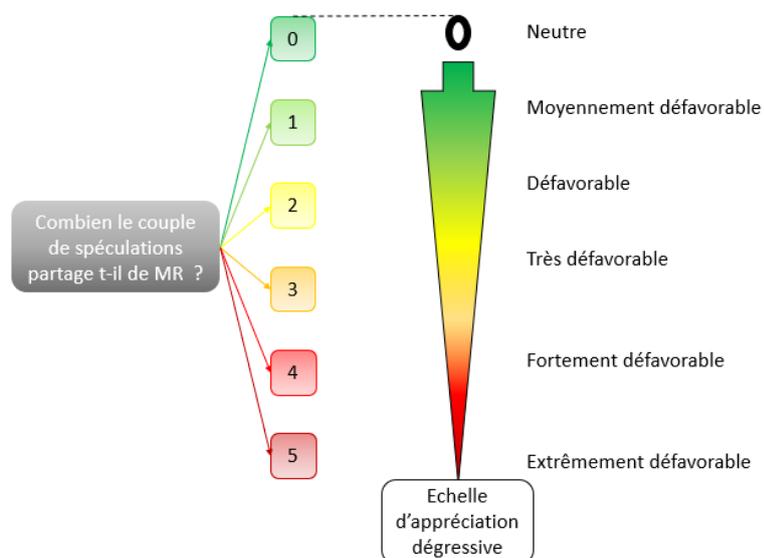


Figure 10 : Arbres de décision relatif aux maladies et ravageurs des cultures

4.3. Critère de choix n°3 : les propriétés chimiques du sol, les impacts et besoins des cultures en éléments minéraux

Tableau 4 : Hiérarchisation des couples de spéculation en fonction de leurs aptitudes à être mis en succession en fonction de la proportion de leur besoin en Azote, Phosphate et Potassium.

Speculation	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Laitue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
Canne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Banane Plantin	0	3	0	0	0	0	0	1	4	4	4	3	1
Banane Dessert	0	3	0	0	0	0	0	1	3	3	3	2	1
Igname	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Haricot V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Laitue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Choux V	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Aubergine	0	4	3	0	0	0	0	1	4	4	4	3	2
Tomate	0	4	3	0	0	0	0	1	4	4	4	3	2
Melon	0	4	3	0	0	0	0	1	4	4	4	3	2
Concombre	0	3	2	0	0	0	0	1	3	3	3	2	2
Giraumon	0	2	1	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2

Chaque couleur correspond au score obtenu par le couple de spéculation en ligne et en colonne.

Légende : Adéquation entre les couples de spéculations au niveau de leurs besoins en éléments minéraux est calculé en faisant la somme des notes obtenues par le couple de spéculations pour chacun des éléments minéraux (N,P et K).

Adéquation des couples :

Forte / Faible : 0

Faible / Forte : 0

Moyenne / Forte : 1

Forte / Moyenne : 1

Faible / Moyenne : 0

Moyenne / Moyenne : 1

Forte / Forte : 2

Faible / Faible : 0

Moyenne / Faible : 0



Rédaction du critère de choix :

Les couples de spéculations sont notés en fonction de la proportion de leurs besoins en éléments minéraux. Plus le score du couple est élevé moins les besoins en éléments minéraux sont compatibles. Il faut donc éviter de les mettre l'une la suite de l'autre dans une succession de cultures. Au contraire un score faible proche de 0 correspond à un couple qui ne prélève pas la même proportion de chaque élément minéral. Les spéculations du couple peuvent donc être mises l'une à la suite de l'autre sans entraîner un épuisement des ressources du milieu.

Le même type de notation est utilisé pour le choix de la spéculations que ce soit pour ce critère ou pour le précédent (maladie et ravageur). Voir figure 10

4.3.1. Les résidus de cultures et la matière organique

La matière organique est un réservoir d'éléments nutritifs, qui grâce à la minéralisation peut être libéré et rendu disponible pour l'absorption par les plantes ou d'autres organismes du sol. La matière organique joue donc un rôle important pour la nutrition des plantes à long terme. Sa teneur doit être maintenue à un taux suffisamment élevé (entre 1 et 5%)(Marsden 2014). Ce critère de choix permet de mettre en évidence les cultures produisant de grandes quantités de matière organique (Mo) par les résidus de culture pouvant être laissés à la parcelle à la fin de leur cycle de production et celles se développant mieux sur des sols dont la teneur en matière organique doit être maintenue à un fort niveau car les besoins en éléments minéraux sont élevés (données issues de fiche technique voir **annexe X**). L'objectif étant de maintenir un niveau de Mo suffisant au cours de la succession de cultures sur 40 ans pour que la qualité reste à un niveau suffisant. Voir en annexe 13 pour voir les étapes pour obtenir le tableau 5.

Tableau 5 : Restitution et besoin en matières organiques des cultures.

Spéculations	Type de résidus	Quantité de matières organiques en fin de culture retournant à la parcelle	Quantité de MO à apporter à la parcelle en début de cycle de production
Canne à sucre	Bagasse, racine, résidus issus de la transformation	Très élevée	NA
Banane dessert	Feuille racine et tronc	Très élevée	NA
Banane plantain	Feuille racine et tronc	Très élevée	NA
Igname	Partie aérienne	Faible	Elevée
Carotte	Fane	Très faible	Moyen
Haricot	Partie aérienne	Faible	Faible
Laitue	Nul	Nulle	Moyen
Choux	Nul	Nulle	Elevée
Tomate	Partie aérienne	Faible	Elevée

Aubergine	Partie aérienne	Faible	Elevée
Melon	Partie aérienne	Faible	Moyen
Concombre	Partie aérienne	Faible	Moyen
Giraumon	Partie aérienne	Faible	Moyen

NA : pas d'information chiffrée

Rédaction du critère de choix :

Le bilan humique à la fin d'un cycle de production sur 40 ans permet de voir si l'apport de matières organiques est suffisant. Les seuls résidus de culture ne peuvent pas subvenir aux besoins des cultures, il faudrait donc prendre en compte les apports de fumier, lisier, amendement ... Selon le type de pratique culturale adoptée ces informations varient. Il faudrait donc les fixer pour chaque culture.

Le bilan de matière organique pourra agir comme un rétro contrôle sur les trajectoires d'exploitation agricole envisagées dans le noyau de viabilité. Au même titre que les contraintes économiques et écologiques sur la qualité du sol, le bilan de matière organique devra être positif ou nul pour que la trajectoire soit sélectionnée dans le noyau de viabilité.

4.4. Critère de choix n°4 : Impact de la prospection racinaire des cultures sur les propriétés physiques du sol : état de compaction.

Voir en annexe 14 pour connaître les étapes permettant de donner la classification présentée en figure 11.

Tableau 6 : Classement des spéculations en fonction de leurs impacts sur le sol.

Profondeur de travail du sol	Sol décompté en profondeur	Sol décompacté dans les couches plus superficielles
Spéculation concernée	Canne à sucre ; Banane ; Dessert ; Banane Plantain	Ignames ; Carotte ; Haricot vert ; Chou vert ; Laitue ; Tomate ; Aubergine ; Melon ; Concombre ; Giraumon

Ce classement tient compte des itinéraires techniques classiques appliqués aux différentes spéculations pour leur mise en culture.

D'autre part nous avons étudié l'impact du développement racinaire sur les propriétés de compacité du sol à la fin du cycle de production de chaque culture. Selon l'architecture et la profondeur d'enracinement du système racinaire les cultures peuvent plus ou moins décompacter le sol pour la culture suivante.

Rédaction du critère de choix :

Comme nous l'avons vu, l'état dans lequel le sol est laissé à la fin d'un cycle de production, correspond à l'état initial du sol de la culture suivante. L'enjeu de ce critère de choix est de faire succéder des cultures ayant les mêmes exigences d'état de compaction et de porosité du sol. Les travaux du sol sont nécessaires mais le choix des successions de culture peut permettre de raisonner le nombre de travaux à effectuer. Dans le but de maintenir une bonne qualité de sol en terme d'activité biologique, les travaux du sol doivent être raisonnés et limités. (Bourguignon et Gabucci 2000)

Les résultats peuvent être résumés de la façon suivante : Graphique des effets.

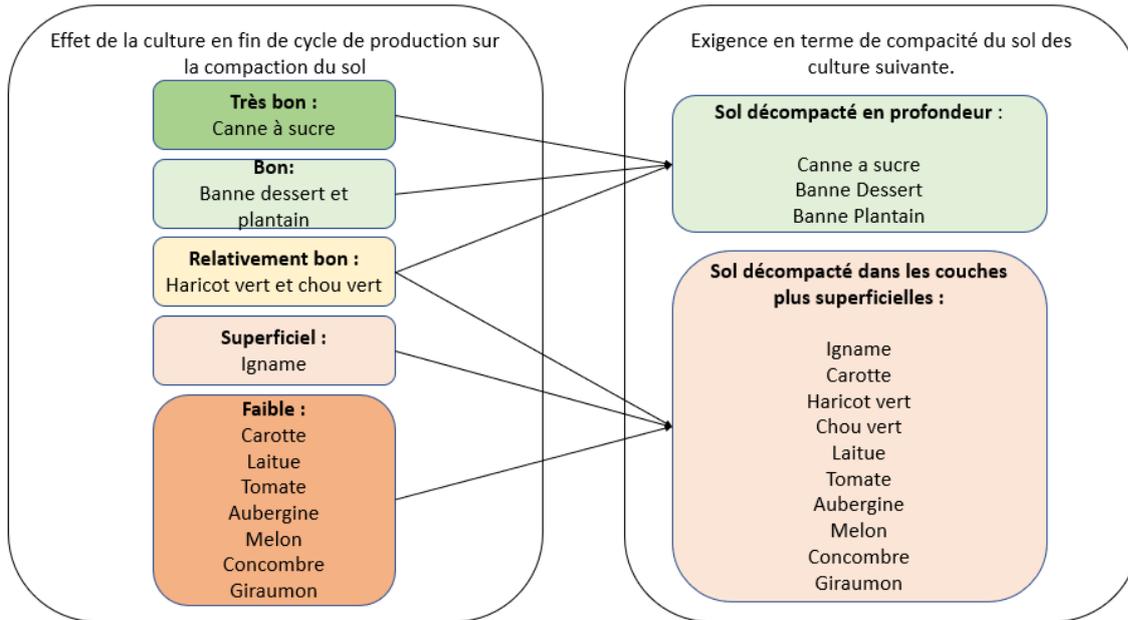


Figure 11 : Critère de choix relatif aux exigences et effet des spéculations sur l'état de compaction du sol.

4.5. Critère de choix n° 5 : la saisonnalité des cultures

Le principe est de permettre au modèle de faire le choix de la spéculation à mettre en place en tenant compte des contraintes de saisonnalité des cultures.

Tableau 7 : Saisonnalité des cultures

Spéculation	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octore	Novembre	Décembre
canne												
banane P												
Banane D												
Igname Alata												
Carotte												
Haricot V												
Laitue												
Chou V												
Aubergine												
Tomate												
Melon												
Concombre												
Giraumon												

Légende : Période d'implantation de la culture

	Optimal
	Possible
	A éviter

Les travaux du sol nécessaires à l'implantation de chaque culture ont été présentés précédemment. Nous évaluons le temps de travail nécessaire à 2 mois pour l'implantation des cultures de canne à sucre, banane déserte et plantain. Pour les cultures maraichères et vivrière nous prévoyons un intervalle de temps de 1 mois entre deux cultures. (D'après les dires d'experts).

4.6 : Synthèse Arbre de décision final :

Les règles de décision agronomiques pour le choix des spéculations du modèle sont résumées dans un arbre de décision final présenté dans la figure 12.

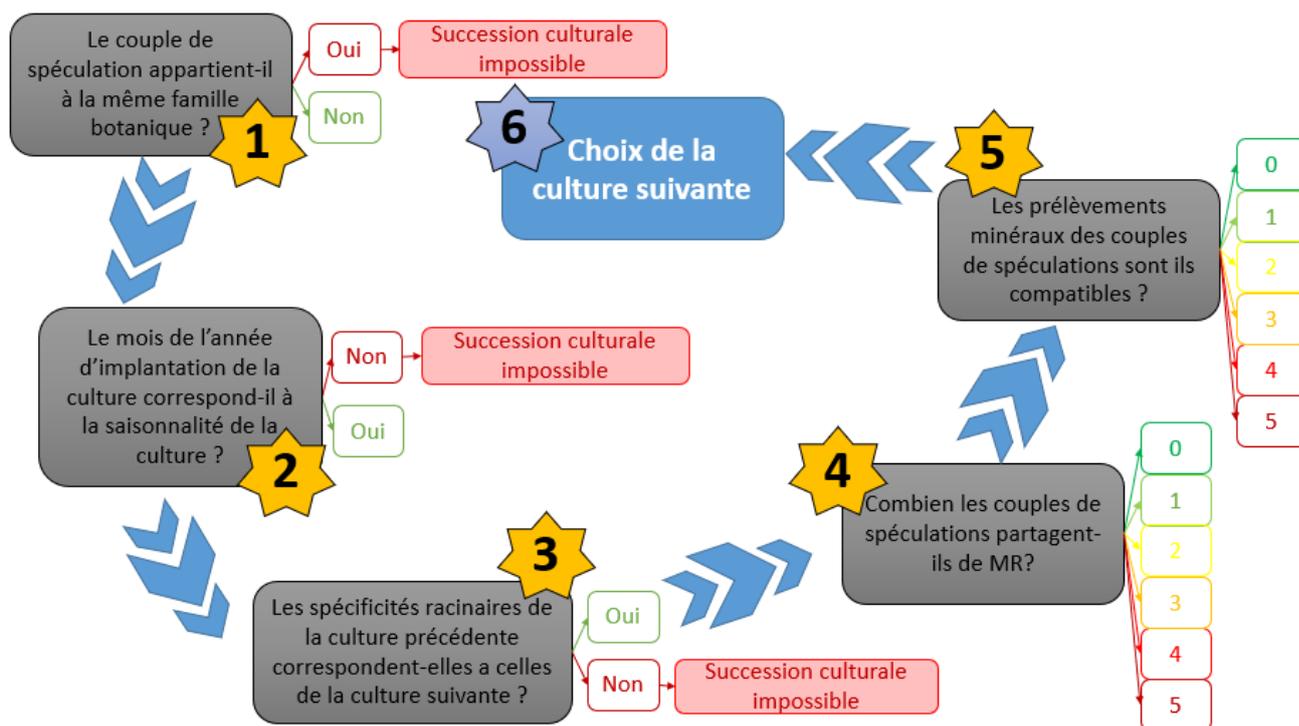


Figure 12 : Arbre de décision final intégrant les différentes règles de décision

Ici nous faisons l'hypothèse que les règles de décision ne sont pas hiérarchisées, chacune d'elles a le même poids dans le choix de la culture suivante. Si une seule réponse parmi les 5 règles de décision déconseille ou interdit une culture, alors nous en testons une autre jusqu'à ce qu'une culture réponde positivement aux règles de décision. Nous pourrions étudier dans un travail complémentaire, l'effet des pratiques culturale choisi par le modelé sur les composantes des regels de décision. En effet l'état de compacité du sol ou la fertilité du sol peut être influencer par le type de pratique culturale choisi, agroécologique ou conventionnel. Pour cela il faudrait fixer clairement les itinéraires techniques associer à chaque partie et chaque culture.

4.6 Evaluation des règles de décision agronomique proposée pour améliorer le modèle.

Nous allons étudier les six études de cas une à une présentées dans l'article Durant et al., 2015. Nous utiliserons pour connaître le nombre de cycle de production par étude de cas, le tableau de durée de chaque cycle de production annexe 7.

4.6.1 Première étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export.

- **Critique agronomique de cette succession :**

Sur cette succession pas d'incohérence agronomique identifiée. Nous allons le montrer grâce aux règles de décisions.

Premièrement : les familles botaniques.

La succession Canne - Banane plantain - Canne ne pose pas de problème pour la famille botanique car la canne et la banane plantain n'appartiennent pas aux mêmes familles botaniques.

Deuxièmement : les maladies et ravageurs partagés.

Les deux spéculations partagent un faible nombre de MR, il n'y a donc pas de contre-indication particulière de les faire se succéder. Ces cultures ne créeront pas de foyer de pathogènes.

Troisièmement : La nutrition des plantes.

La canne et la banane ne prélèvent pas les pas les mêmes proportions d'éléments minéraux, elles peuvent donc se succéder.

Quatrièmement : la compaction du sol.

Le bananier et la canne sont des cultures aux racines profondes qui ont de bonne qualité de décompaction, il est donc judicieux de les faire se succéder.

Cinquièmement : la matière organique.

Ces deux spéculations produisent une grande quantité de MO, elles permettent donc de renouveler le stock de Mo du sol pour la culture suivante.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturale :**

Celle-ci est cohérente en terme agronomique.

4.6.2 Seconde étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export et avec changement de culture imposé.

- **Critique agronomique de cette succession :**

Deux cycles de production de canne à sucre et de banane plantain se suivent directement. Le critère de choix relatif aux familles botaniques exclut les successions de deux spéculations de la même famille botanique, or c'est le cas dans cette situation.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturale :**

Nous intercalons un cycle de production de banane plantain entre les 2 cycle de production de canne à sucre. Cela permet également de désolidariser les deux cycles de production de banane plantain qui se suivait directement. Les périodes d'alternance de jachère longue et courte sont maintenus.

Proposition possible :

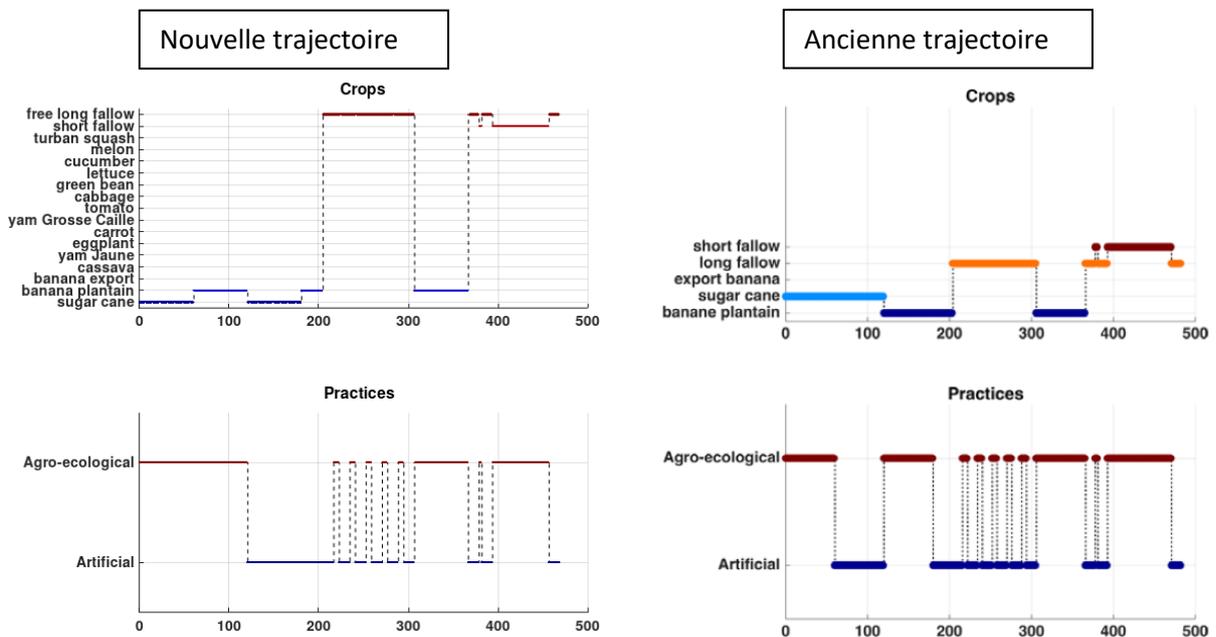


Figure 13 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°2

Evaluation BISQ et revenu de la nouvelle proposition

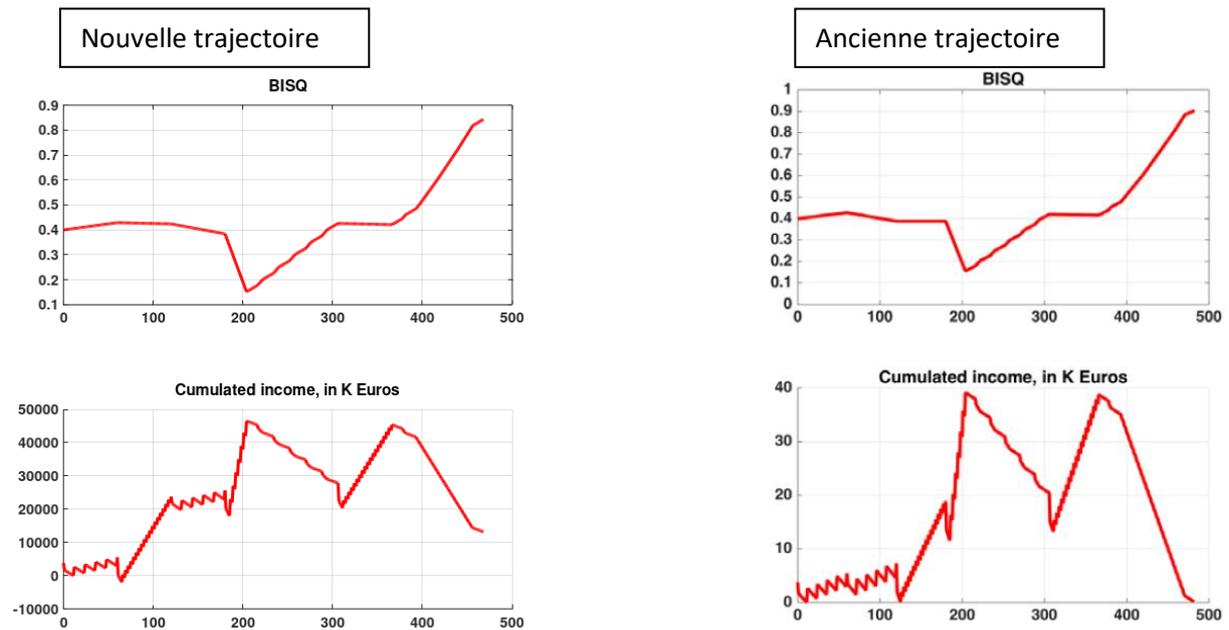


Figure 14 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°2.

Nous n'observons pas de différence notable pour l'évolution de la qualité de sol. En revanche nous observons une nette différence de revenu cumulé la nouvelle proposition permet de finir avec un revenu cumulé positif. Cela s'explique par une faible baisse des revenus en fin de trajectoire.

4.6.3 Troisième étude de cas : Modèle destiné au marché de l'export et en minimisant les coûts de mise en place de chaque nouvelle culture.

- **Critique agronomique de cette succession :**

Cinq cycles de production de canne à sucre se suivent directement. Le critère de choix relatif aux familles botaniques interdit les successions de deux spéculations de la même famille botanique, or c'est le cas dans cette situation. Il faut donc diversifier ou tout du moins séparer les cycles de production de canne pour intercaler une autre culture ou de la jachère.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturale :**

Une telle proposition permet d'avoir les résultats économiques et de qualité de sol suivant :

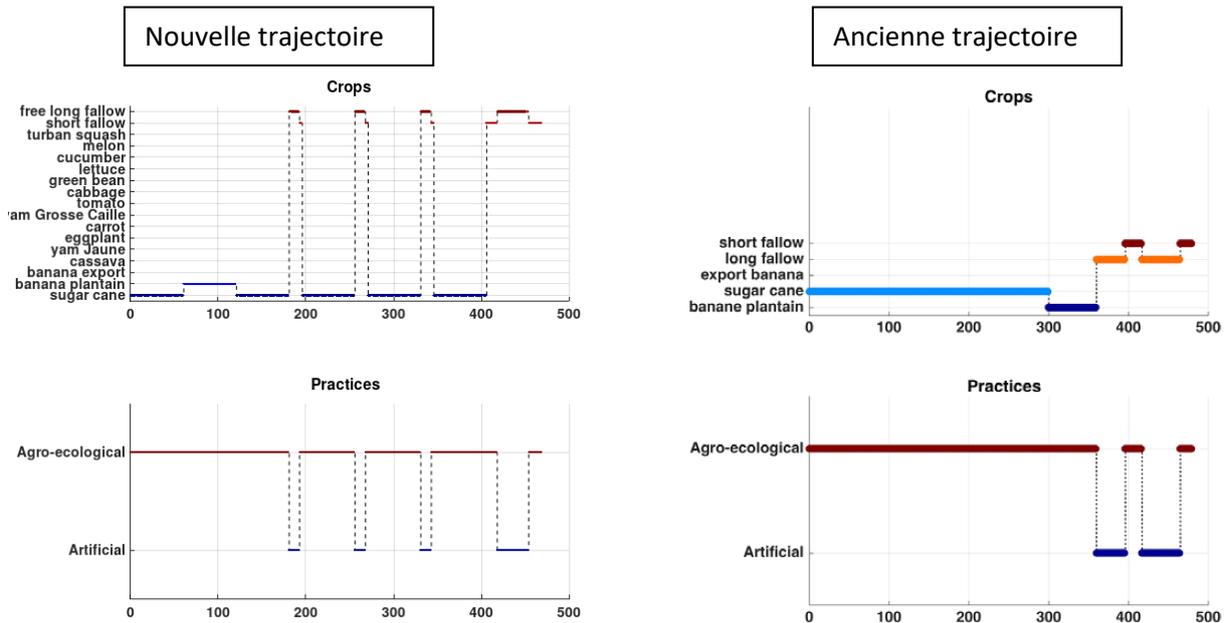


Figure 15 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°3

Evaluation BISQ et revenu de la nouvelle proposition

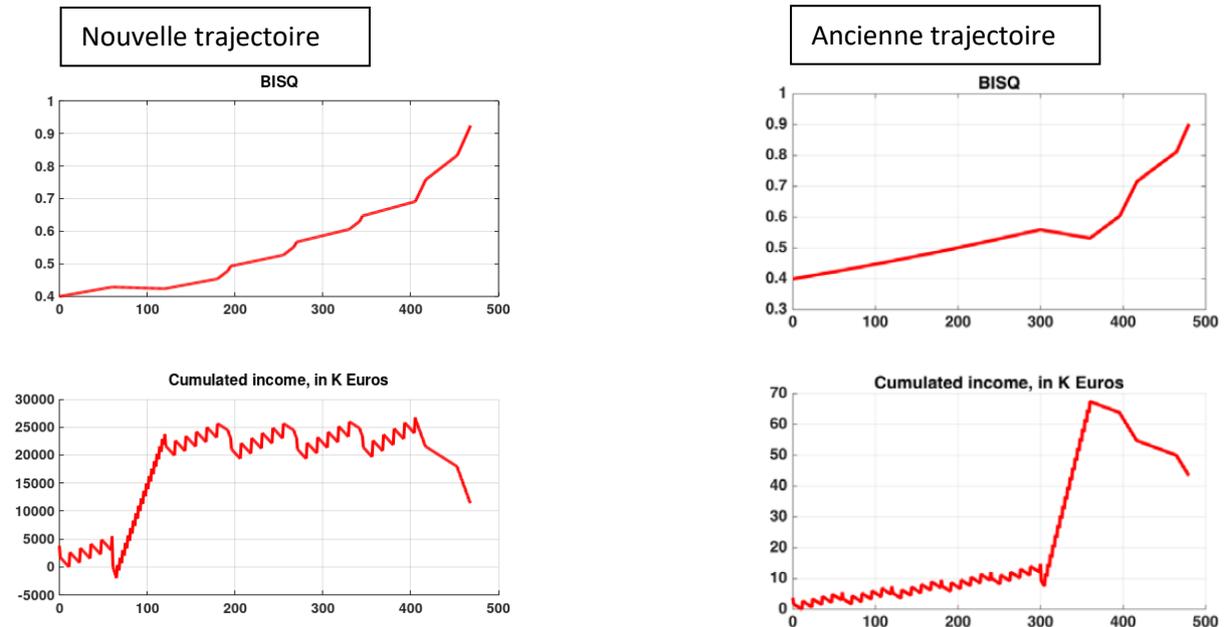


Figure 16 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°3.

Nous n'observons pas une modification de l'évolution de la qualité de sol, qui se fait de façon progressive car les cycles de production ont été étalés dans le temps au lieu d'être concentrés sur une courte période. En revanche cette modification a eu un effet négatif sur le revenu cumulé, il est nettement moins important (perte nette de 30 000€). Le positionnement du cycle de production de banane plantain est en cause. Le fait de l'avoir placé en début de trajectoire limite les revenus par rapport à une mise en culture plus tardive. Cela peut être dû au fait que c'est une culture très sensible à la qualité de sol ($r_i=0.7$), or en début de culture la qualité de sol est encore faible.

4.6.4 Quatrième étude de cas : Modèle destiné au marché local avec un capital initial plus faible.

- Critique agronomique de cette succession :

Dans cette succession de culture, le principal problème agronomique se situe au niveau de la succession d'une période de production de tomate à la suite de celle d'une aubergine. Ces deux

cultures appartiennent à la même famille botanique, il n'est pas recommandé de les mettre d'une à la suite de l'autre. En effet ces deux cultures partagent 4 MR, cette succession peut être à l'origine d'un foyer de maladies ou de ravageurs. De plus ces cultures consomment les mêmes ressources du sol en éléments minéraux, elles cumulent un score de 4 dans le tableau relatif aux besoins des cultures.

D'autre part, le couple de spéculation carotte/laitue partage 2MR il y a donc un risque de transmission de MR de la première culture à la suivante. De même, le couple haricot/laitue partage 1MR. Idéalement il faudrait qu'il n'y ait aucun MR en commun.

Les autres successions de culture ne présentent pas d'incohérence au regard des règles de décisions. Elles n'ont pas de MR en commun, elles ne prélèvent pas les mêmes proportions d'éléments minéraux du sol, La compacité du sol permet le bon développement des cultures, elles n'appartiennent pas aux mêmes familles botaniques.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturelle :**

Une telle proposition permet d'avoir les résultats économiques et de qualité de sol suivant :

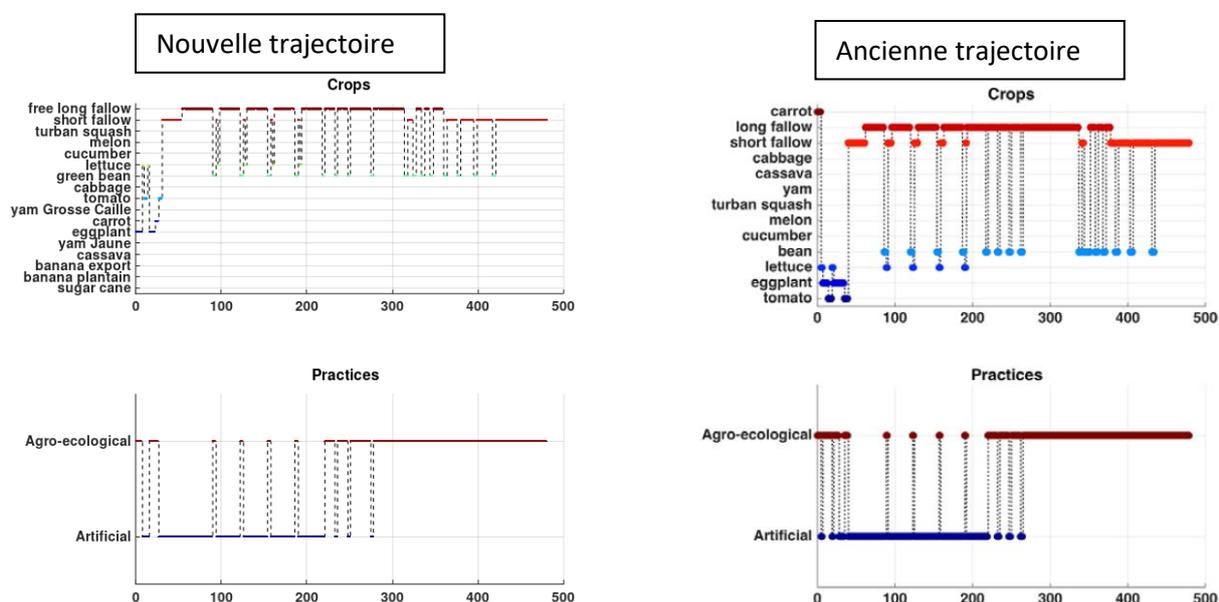


Figure 17 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°4.

Evaluation BISQ et revenu de la nouvelle proposition

Nouvelle trajectoire

Ancienne trajectoire

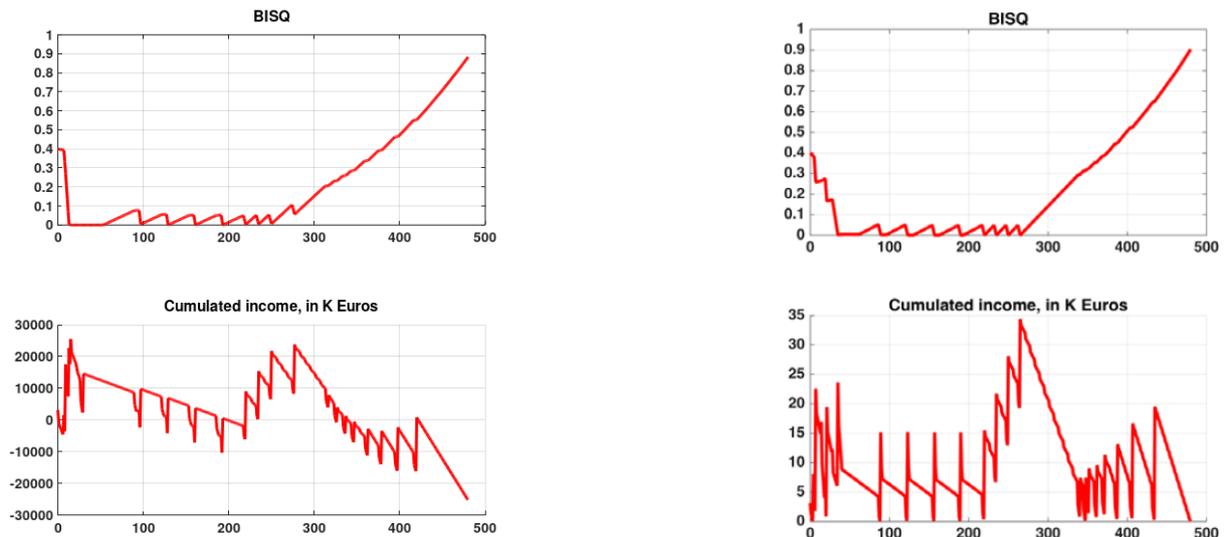


Figure 18 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°4.

La qualité de sol n'est pas fortement modifiée. En revanche le revenu cumulé est négatif à la fin de la trajectoire.

4.6.5 Cinquième étude de cas : Modèle destiné au marché local sur un laps de temps plus court.

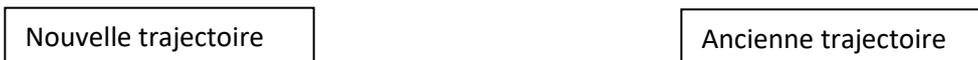
- **Critique agronomique de cette succession :**

Au même titre que la succession précédente, présentée dans la figure 10, le couple de culture aubergine/tomate partage 4 maladies et ravageurs, consomme les mêmes ressources du sol et appartient à la même famille botanique. Il n'est donc pas recommandé de les faire se succéder.

D'autre part deux périodes de production de haricot et d'aubergine se succèdent directement, il faut donc intercaler une autre culture ou introduire une période de jachère entre les deux cycles de production de haricot et une autre culture entre les deux cycles de production d'aubergine.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturale :**

Une telle proposition permet d'avoir les résultats économiques et de qualité de sol suivant :



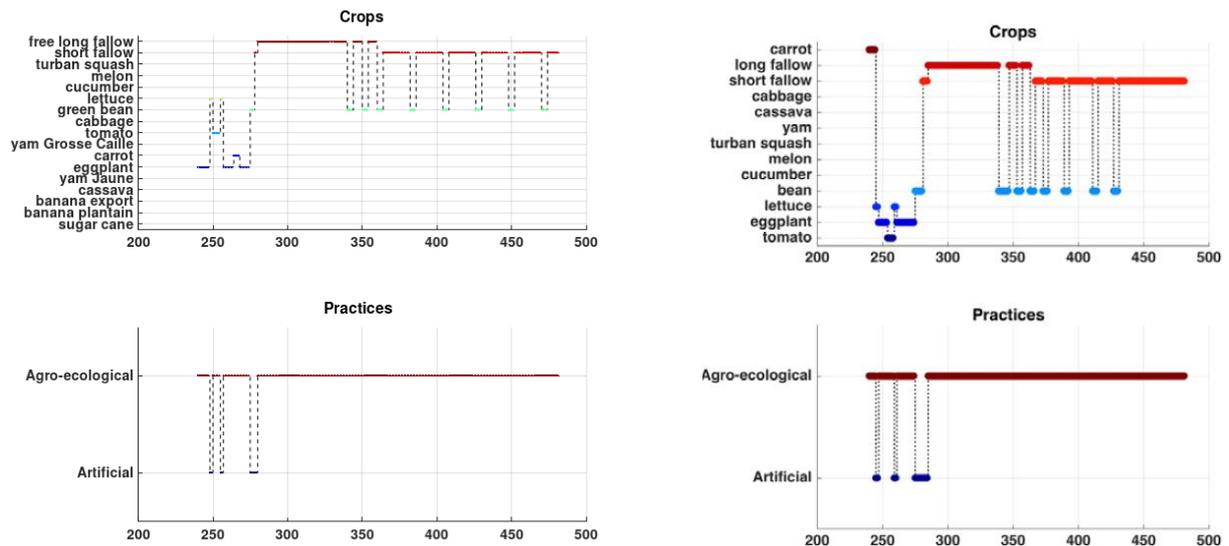


Figure 19 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°5.

Evaluation BISQ et revenu de la nouvelle proposition

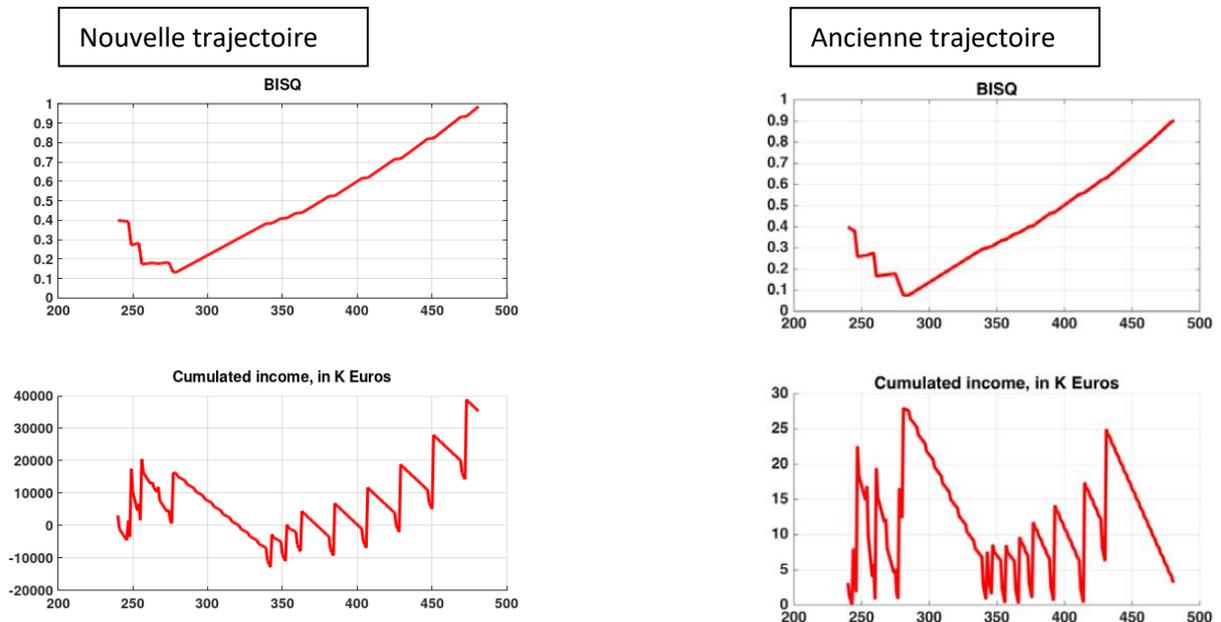


Figure 20 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°5.

La qualité de sol est améliorée, elle atteint le maximum. Les revenus cumulés en fin de trajectoire sont identiques en revanche les variations sont bien moins importantes. Les grains sont moins importants mais les pertes également, c'est ce qui a permis d'arriver au même résultat final.

4.6.6 Sixième étude de cas : Modèle destiné au marché local sur un laps de temps plus court et des ressources financières élevées.

- **Critique agronomique de cette succession :**

Cette succession ne fait intervenir que des haricots et de la jachère. Les règles de décisions n'interdisent en aucun cas ce genre de trajectoire d'exploitation. En revanche nous pouvons relever un manque de diversité dans les cultures mises en place. Il pourrait être plus intéressant pour les ressources du sol ainsi que pour éviter la propagation des ravageurs et maladies de diversifier la succession avec d'autres cultures.

- **Proposition d'une nouvelle succession culturale :**

Une telle proposition permet d'avoir les résultats économiques et de qualité de sol suivant :

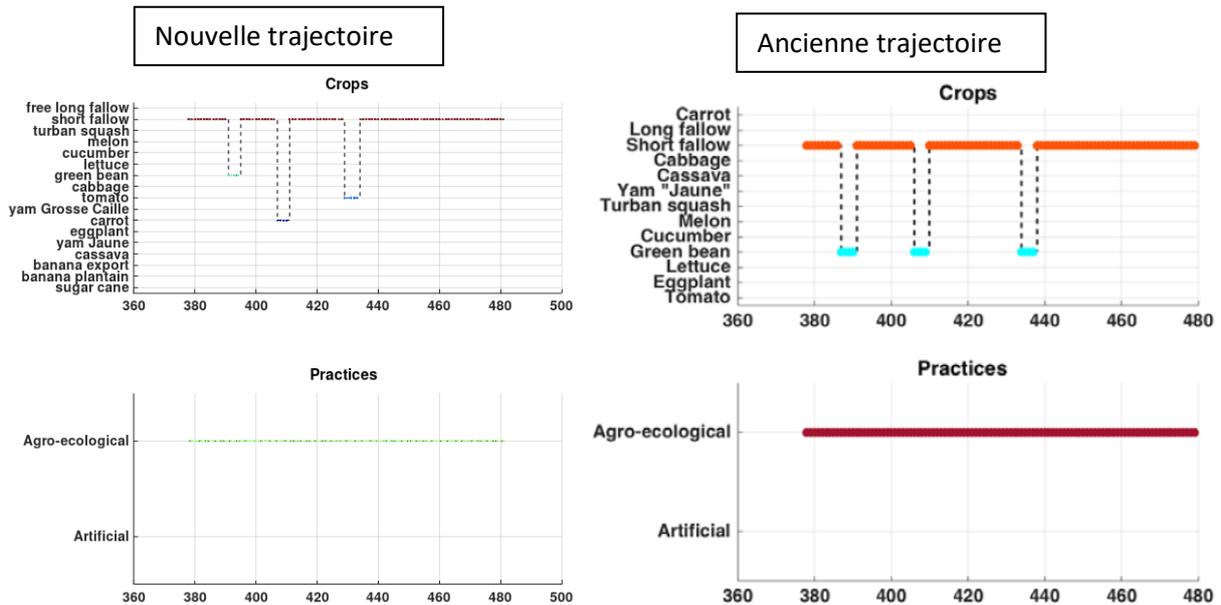


Figure 21 : Nouvelles et ancienne trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°6.

Evaluation BISQ et revenu de la nouvelle proposition

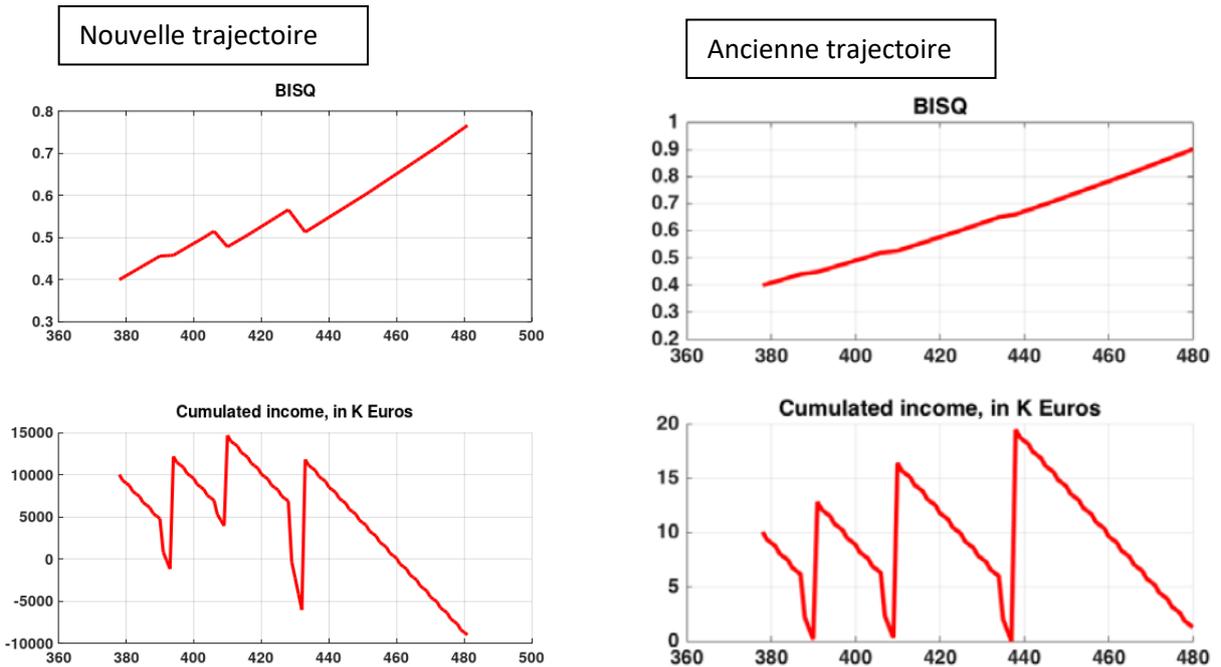


Figure 22 : Résultats de l'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle trajectoire d'exploitation pour l'étude de cas n°6.

La qualité de sol est inférieure car l'action des autres cultures proposées par rapport à la culture de légumineuse a un effet négatif. Le revenu cumulé est négatif, cela est dû au fait que les cultures sont moins lucratives que le haricot, les périodes de jachère ne sont pas compensées par la culture.

Les nouvelles propositions de trajectoires d'exploitations n'améliorent pas systématiquement la qualité de sol ni les gains financiers. Cela peut être expliqué par le fait que la façon dont est calculé le rendement ne prend pas en compte les effets positifs à long terme de la diversification des cultures.

En effet les règles de décision permettent de limiter la formation de foyer de pathogène dans le but de limiter les pertes de rendement dues à des maladies ou ravageurs. Cette spécificité n'est pas mesurée par le modèle. De même les gains que sont supposés apporter le raisonnement des successions pour améliorer la compacité et limiter les travaux de sol, ne sont pas mesurés par l'indicateur de qualité de sol le BISQ. Nous allons voir dans la partie suivante comment nous pourrions envisager les perspectives d'améliorations.

5) Discussion

5.1. Discussion du modèle

Lors de la construction du modèle GAIA SCOPE un certain nombre de choix a été fait. Le modèle effectue les calculs à l'échelle d'une parcelle d'un hectare. Pour représenter la trajectoire d'une exploitation agricole, la réflexion à une échelle pluri-parcellaire pourrait être plus pertinente étant donné le fait que les agriculteurs ont la plupart du temps plusieurs parcelles et plusieurs cultures en même temps. Cela permettrait de modéliser le fonctionnement d'une exploitation dans sa globalité.

Les pratiques culturales s'expriment dans le modèle à travers deux modalités : soit **agroécologique**, soit **conventionnelle**. La définition de ces pratiques reste succincte et ne permet pas de déterminer un itinéraire technique précis pour chaque spéculation. La frontière entre deux types de pratique peut être floue. La pratique « agriculture biologique pourrait être un compromis, car elle est définie clairement et permettrait de distinguer des itinéraires techniques différents. D'autre part le modèle propose des changements de pratiques qui peuvent avoir lieu à chaque mise en place de nouvelles spéculations. Un agriculteur produisant sur une même parcelle ne va généralement pas changer de type de pratique à chaque changement de spéculation. Le choix de production agroécologique peut être du à un engagement idéologique, il ne semble alors pas cohérent d'alterner des pratiques agro écologiques et conventionnelles sur une même parcelle au cours des 40 années de la trajectoire d'exploitation. Pour la production biologique il existe un frein à ce genre de changement de pratique car pour que la pratique agriculture biologique soit labélisée il faut un temps de conversion de plusieurs années (3 ans) pour que les résidus d'intrants chimiques non autorisés en bio soient éliminés de la parcelle. Il semble donc évident qu'un changement de pratique à un pas de temps court (moins de 3 ans) n'a pas de sens.

Le choix du **BISQ**, comme nous l'avons vu ne prend en compte qu'un nombre restreint de paramètres du sol. Le sol possède des caractéristiques :

- Physiques (compaction, composition en éléments plus ou moins grossiers allant du limon au sable).
- Chimique en éléments minéraux utiles par la culture, à savoir l'Azote, le Phosphate, le Potassium P, le Magnésium ... La composition en Matières Organiques.

L'évolution de ces paramètres n'est pas modélisée et pourrait être étudiée en effectuant des bilans de matière organique, des évaluations de quantités d'éléments minéraux, azote par exemple en fin de cycle de production. Ce sont des paramètres importants pour la dynamique de production agricole. Le sol est également caractérisé par son activité biologique, le BISQ étudie la composition et la teneur en macro-invertébrés, mais d'autres êtres vivants agissant sur les propriétés du sol et donc sur la qualité. La micro faune, les vers de terre et les micorises, sont autant d'organismes vivants pouvant être ajoutés à l'évaluation de la qualité du sol. Le stock de semences dans les sols peut également être un indicateur intéressant à étudier pour évaluer l'évolution de la flore adventice.

Les indicateurs de viabilité du modèle GAIA SCOPE sont : le BISQ pour l'indicateur de qualité de sol et le revenu cumulé pour l'indicateur économique. Il est intéressant de choisir des indicateurs de viabilité provenant de deux disciplines différentes sans que ces paramètres aient été hiérarchisés

(spécificité de la théorie de la viabilité). Toutefois ces choix peuvent être discutés car la viabilité d'une exploitation agricole dépend aussi d'autres facteurs qui ne sont pas agrégés dans ces deux variables. La composante sociale de l'agriculture, les temps de travaux, la pénibilité, sont autant de paramètres qui ne sont pas pris en compte et pourtant importants pour l'étude de la viabilité d'une exploitation agricole. D'autres modèles ont choisi d'évaluer la durabilité. Dans la notion de durabilité la dimension sociale s'ajoute à la dimension écologique et économique que l'on observe déjà dans la viabilité.

Les modèles peuvent étudier différents aspects de la durabilité, certains évaluent la durabilité globale des exploitations. C'est le cas d'IDEA et Dexi. D'autres modèles étudient plus en profondeur certaines spécificités de la durabilité, qui peuvent être : performance énergétique, gestion de l'herbe ...

Le modèle IDEA est un outil de diagnostic permettant d'évaluer la durabilité globale d'une exploitation agricole par analyse multicritères. Trois dimensions sont étudiées : une agroécologique, une socio-territoriale et une économique. Un questionnaire permet de chiffrer les forces et les faiblesses de l'exploitation agricole face à ces trois dimensions, en notant ces pratiques. (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation 2016)

La méthode Dexi évalue elle aussi la durabilité globale mais à l'échelle de la parcelle, elle évalue les systèmes de culture. Elle se base également sur trois piliers : économique, social et environnemental. 57 critères d'entrées sont nécessaires, ce sont les informations facilement relevables sur le terrain, à entrer dans le modèle, cela donne lieu à 81 critères agrégés permettant de noter la durabilité des trois piliers et déterminer le niveau de durabilité global du système de culture. (Bergez 2016).

L'indicateur de durabilité créé par le Réseau Agriculture Durable (RAD) est un indicateur de durabilité global à l'échelle de l'exploitation. Il est assez proche du fonctionnement d'IDEA. (Réseau agriculture durable 2018). Le RAD est une source d'information sur la thématique de la durabilité des exploitations agricoles. Ce réseau travaille en partenariat avec le réseau CIVAM (Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural).

L'indicateur durabilité spécifique développé par Solagro nommé Dialecte effectue un diagnostic agroenvironnemental permettant de décrire le système de production et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement à l'échelle de l'exploitation. C'est une analyse multi critères à partir d'un questionnaire. (Solagro 1994)

D'autres modèles avec des indicateurs spécifiques de la durabilité : le Bilan PLANETE développé par SOLAGRO qui dresse un bilan énergétique (Lusson et D.Falaise 2006),

Ces modèles permettent d'évaluer la durabilité de systèmes déjà existants, sur un panel de critères de durabilité plus étendu que celui du modèle GAIA SCOPE. En revanche ils ne proposent pas de trajectoire d'exploitation durable comme le fait GAIA SCOPE. Chaque modèle est spécifique à un certain type de production (grande culture, viticulture, maraichage, arboriculture ...). En effet chaque production à un fonctionnement spécifique ; il faut donc adapter les modèles pour qu'ils s'adaptent aux spécificités de chacune. Pour GAIA SCOPE la différence se fait principalement entre les cultures d'export et celles de diversification, destinées au marché local.

Les paramètres entrés dans le modèle peuvent être discutés. Les durées de cycle de production sont présentées en annexe 10. Pour la banane dessert la période de production est de 4 à 6 ans en fonction des zones et des conditions de culture. La banane plantain est généralement renouvelée tous les deux ans car celle-ci est davantage touchée par les charançons.(Marie Bezard 2017). Le cycle de culture de la canne correspond au temps écoulé entre la plantation et la récolte du dernier rejeton, c'est ce que nous appellerons période de production. En moyenne cette période dure 5 ans. Cette période est déterminée par le rendement agricole. En effet au cours de la période de production les rendements de la culture décroissent. Il est tout de même possible de trouver des parcelles avec de hauts rendements

après 12 ans de récoltes. La diminution des rendements s'explique par le vieillissement des souches qui se soulèvent et donc les repousses sont de moins en moins vigoureuses. Ce phénomène est aggravé par de mauvaises pratiques agricoles. (C.Dinis et N.Wagner 2005).

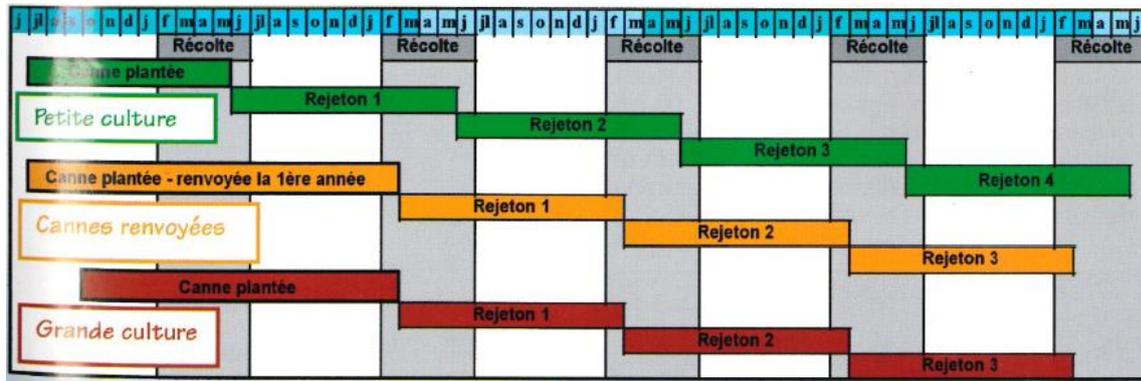


Figure 23 : Cycle de culture de la canne à sucre en Guadeloupe.

Source : C.Dinis et N.Wagner. 2005. « Manuel technique de la canne à sucre », CTIC'S Guadeloupe, décembre, 94.

Dans la réalité du terrain, il arrive que des agriculteurs fassent se succéder deux cycles de production de deux spéculations de la même famille botanique. Il est possible de planter une tomate à la suite d'une aubergine ou un giraumon à la suite d'un concombre. Dans le cadre du modèle on fait l'hypothèse que les paramètres agronomiques sont optimisés, de telle sorte que les successions culturales comprenant deux spéculations de la même famille botanique sont considérées comme impossibles. L'optimisation du paramètre agronomique n'est pas le seul facteur pris en compte par les agriculteurs pour la mise en place des successions culturales. D'autres paramètres régissent ces choix, mais nous nous concentrerons sur les paramètres agronomiques dans ce travail.

5.2. Discussion sur les résultats

Dans ce travail chaque critère de choix a le **même poids**, c'est-à-dire chacun d'entre eux a la même importance dans le choix de la succession de culture. Cette hypothèse peut être discutée. Une **hiérarchisation** pourrait être envisagée à l'aide d'entretiens avec des agriculteurs pour connaître l'importance qu'ils apportent à chaque critère de choix dans leurs choix de trajectoire d'exploitation.

Les règles de décision relatives aux familles botaniques englobent les autres règles de décision. L'appartenance de cultures à une même famille botanique induit le fait que les cultures vont pouvoir avoir une physiologie proche, amenant des modifications du milieu relativement similaires. Les autres règles de décision (maladies et ravageurs, prélèvement en éléments minéraux, apport de matière organique, effet des racines sur la compacité du sol, saisonnalité) vont être autant de composantes prises en compte dans le concept de famille botanique. En revanche les résultats montrent que la corrélation n'est pas exactement observable pour chacune des règles de décision, il est donc important, pour le fonctionnement du modèle, de fixer cette contrainte.

Les critères de choix tels qu'ils ont été construits sont basés sur une échelle de valeur quantitative faite à partir de données issues de recherches bibliographiques. Ces données peuvent être représentatives de l'agriculture antillaise, mais des analyses expérimentales relevées sur le terrain pourraient être plus représentatives et pertinentes.

L'évolution de la qualité de sol et des revenus cumulés pour les nouvelles propositions de trajectoire d'exploitation présentent des résultats discutables. En effet les règles de décisions agronomiques au regard desquelles nous avons proposé de nouvelles trajectoires d'exploitation, n'influencent pas toujours positivement la création de richesses supplémentaires. D'autre part les paramètres sur lesquels jouent les règles de décision agronomique ne sont pas pris en compte directement dans l'évaluation des trajectoires d'exploitation.

5.3. Perspectives

Le formalisme du modèle pourrait être modifié pour étendre le panel des paramètres de contrôles de type agronomique. En effet les variables d'état qui sont actuellement : la qualité de sol et le revenu cumulé sont calculés à partir du rendement. Or dans les formules de calculs aucune variable ne fait référence à la propagation des maladies ou à l'état de compacité du sol... Il pourrait donc être judicieux d'intégrer au modèle GAIA SCOPE plusieurs variables agronomiques qui permettraient de faire les choix de succession en fonction de variable agronomique tel que proposé dans ce travail. Il faudrait alors modifier le formalisme mathématique de calcul du rendement en tenant compte de l'influence des paramètres agronomique.

Pour affiner les choix du modèle, d'autres paramètres pourraient être pris en compte. Les concepts agronomiques sont fondamentaux mais d'autres éléments sont pris en compte par les exploitants pour les choix de la mise en place de leurs successions de culture. Dans le but de rendre plus pertinente et réaliste les propositions de trajectoire du modèle, il serait intéressant d'y intégrer en particulier :

Un critère de choix relatif aux **temps de travaux**. Ceux-ci varient en fonction de la culture et de la pratique. L'itinéraire technique choisi par l'agriculteur impacte fortement les temps de travaux associés. Nous pourrions considérer que la pratique agroécologique, du fait de la faible utilisation d'intrant chimique, nécessite plus de temps de travail. Alors que la pratique conventionnelle en demande moins. Le choix de succession de cultures et de la pratique peut être influencé par ce paramètre. Il conviendrait de comptabiliser ces différentiels de temps de travaux pour chaque culture et chaque pratique et d'évaluer, à partir d'entretiens, l'importance de ce paramètre dans le choix des agriculteurs.(Heddadj 2013)

Certaines successions de cultures reviennent régulièrement. Elles sont observées en Guadeloupe ou en Martinique. Ces **successions de cultures** trouvent leurs origines dans les pratiques ancestrales **traditionnelles** du jardin créole. Il serait intéressant d'identifier un certain nombre de ces successions et de les proposer dans le modèle comme possible. Ces successions de cultures traditionnelles sont représentatives de l'agriculture antillaise et permettraient de rendre plus réaliste les propositions de trajectoires de modèle. Voir en Annexe X les trajectoires traditionnellement utilisées dans les Antilles françaises.

La **faisabilité technique** de la mise en place des cultures est également un paramètre pouvant être ajouté aux paramètres régissant le choix des successions et des pratiques de cultures des agriculteurs. En effet certaines cultures nécessitent un matériel spécifique (exemple de la culture de canne, avec la récolte). On pourrait lister les freins techniques au changement de cultures et ainsi mettre en évidence les successions de cultures difficilement mises en place sur le plan technique.

Les **autres facteurs** qui peuvent influencer le choix de système de culture, les prise de décision de l'agriculteur peuvent se faire à différents niveaux : **1** le système de culture fait partie de l'ensemble de l'exploitation, **2** les systèmes de culture sont influencés par les relations entre les exploitations agricoles, **3** le système de culture est influencé par l'environnement économique, **4** le système de culture est influencé par la politique agricole. (Sebillotte M 1990) et (Tayeb Ameziane El Hassani - Etienne Persoons 1995).

D'autres perspectives sont envisageables pour étendre l'utilisation du modèle :

- Travail sur **d'autres spéculations** représentatives de l'agriculture antillaise : la pastèque, les herbes aromatiques, l'agriculture en sous-bois telles que le cacao, la vanille, le café.
- L'ajout des **associations de culture** serait également très intéressant, ajout comme spéculation à part entière. Importance des associations culturelles car pratique répandue surtout pour les cultures maraichères et vivrières.

6) Conclusion

Nous avons proposé plusieurs règles de décision agronomique permettant d'affiner le choix des trajectoires d'exploitation. Les critères de choix proposés portent sur les thématiques suivantes : les familles botaniques, les maladies et ravageurs des cultures, la fertilité organo-minérale du sol, la compacité du sol et la saisonnalité des cultures. L'évaluation des nouvelles trajectoires d'exploitation proposée en tenant compte de ces 5 thématiques n'a pas permis de mettre en évidence une amélioration significative des performances sur le plan économique et écologique (qualité de sol). En revanche les trajectoires proposées sont plus réalistes et durables d'un point de vue purement agronomique. Ces résultats sont à nuancer. En effet, le formalisme mathématique qui permet de calculer les performances des trajectoires d'exploitation ne prend pas en compte les améliorations agronomiques proposées. Une perspective de ce travail pourrait donc être de modifier les équations mathématiques d'évaluation des trajectoires. D'autre part ce travail essentiellement bibliographique pourrait être étayé par une étude consultative auprès des acteurs locaux, notamment pour la hiérarchisation des critères de choix.

Bibliographie

- Abenon L-R. 1992. *Petite histoire de la Guadeloupe*. L'Harmattan. ed. Paris.
- Agreste. 2010. « Ministère de l'agriculture et de l'alimentation - agreste - La statistique, l'évaluation et la prospective agricole - Guadeloupe ». 2010.
<http://agreste.agriculture.gouv.fr/en-region/guadeloupe/>.
- . 2015. « Enquête sur la structure des exploitations agricoles 2013 ». Guadeloupe : MAAF - Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. P.6.
- . 2017. « Mémento de la statistique agricole, 2016. » Direction de l'alimentation et de l'agriculture et de la forêt en Guadeloupe. P.12.
- Ahohoundo Alexis. 2009. « Production de saccharum officinarum (canne à sucre) dans la commune de Sèmè-Podji: impacts socio-économiques et environnementaux. » Mémoire. Université d'Abomey-Calavi.
https://www.memoireonline.com/01/12/5096/m_Production-de-saccharum-officinarum-canne--sucre-dans-la-commune-de-Seme-Podji-impacts-socio18.html.
- Amundson R, Berhe A-A, Hopmans J-W, Olson C, Sztein A-E, et Sparks D-L. 2015. « Soil and human security in the 21st century ». 2015.
- Angeon Valérie. 2017. « Compte-rendu de fin de projet. Projet ANR-AA-PPPP-000 : GAIA-TROP. » Programme Agrobiosphère Edition 2012.
- Ano Georges, Anais Guy, et Chidiac Alain. 2002. « PHYTOMA - La défense des végétaux ». *Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe*, août 2002.
- Arvalis. 2010. « Les légumineuses », juillet. <https://doi.org/ISBN:978-2-8179-0037-7>.
- Aubin, Jean-Pierre. 2009. *Viability Theory*. Springer Science & Business Media.
- Aurela Lucie, Jacoby-Koaly Christina, et Boc Christophe. 2017. « BSV971 cultures vivrières Bilan 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal -Fredon Guadeloupe. 2017.
http://daaf.Guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_vivrieres_Bilan2017_cle47adf7.pdf.
- Aurela Lucie, Jacoby-Koaly Christina, et Boc Christophe. 2017a. « BSV971 canne à sucre Bilan 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal - Fredon Guadeloupe. 2017.
http://daaf.Guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_canne_Bilan2017_cle0731a9.pdf.

- . 2017b. « BSV971 cultures maraichères Bilan 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal. 2017. http://daaf.Guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_maraichères_Bilan2017_cle87fe9e.pdf.
- . 2017c. « culture canne à sucre -N°07 du 17 octobre 2017 ». COPHYTO. Bulletin de santé du végétal - Fredon Guadeloupe. 2017. http://daaf.Guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_Grandes_cultures_CAS_17102017-N07_cle4f3ba6.pdf.
- . 2017d. « Culture banane commerciale - n°07. » ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal - Fredon Guadeloupe. 28 septembre 2017. http://daaf.Guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_GrandesCultures_BANANE_28092017-N07_cle89dc1f.pdf.
- Barbier Bruno, et Benoit-Cattin Michel. 1997. « Viabilité à moyen et long terme d'un système agraire villageois d'Afrique soudanosahélienne. Le cas de Bala au Burkina Faso ». *Économie rurale*, 1997.
- Benadjaoud A. 2015. « Morphologie et Anatomie de l'appareil végétatif des Spermaphytes Racine », 2015.
- Bergez, Jacques-Eric. 2016. « Découvrir l'outil DEXiFruits - INRA ». 2016. <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/DEXiFruits/2-+D%C3%A9couvrir+DEXiFruits>.
- Bernard Claire. 2012. « La théorie de la viabilité au service de la modélisation mathématique du développement durable. Application au cas de la forêt humide de Madagascar ». These, Ecole doctorale des sciences fondamentales ' N° 685: Université Blaise Pascal U.F.R. Sciences et Technologies.
- Beugnon. M, et Champion. J. 1966. *Etude sur les racines du bananier*. Institut Français de la Recherche Fruitière Outre-Mer. Vol. 21. Document IFAC 7. http://agritrop.cirad.fr/457946/1/document_457946.pdf.
- Bezard Marie. 2017. « Caractérisation de la culture de la banane plantain en Guadeloupe : diversité des pratiques, performance écologique et référencement technico économique ». Rapport de stage en fin d'étude. Guadeloupe: INRA Antilles Guyane - Montpellier SupAgro.
- Bourguignon, Claude, et Lydia Gabucci. 2000. « Comparaisons of Chemical Analysis and Biological Activity of Soils Cultivated by Organic and Biodynamic Methods ». L.A.M.S., 21120 Marey-Sur-Tille, France.
- Cabidoche, Y.-M. 1997. « Carte pédologique simplifiée de la Guadeloupe. »
- Camacho, N Ruiz, E Velasquez, A Pando, T Decaëns, et F Dubs. 2009. « Indicateurs synthétiques de la qualité du sol ». *Etude et Gestion des Sols*, 16.
- Caneill, Jacques, Jean Roger-Estrade, Gladys Loranger-Merciris, et Marc Dorel. 2014. « Les plantes de service : une alternative au travail du sol dans les systèmes de culture d'ananas ». CIRAD Guadeloupe: Université des Antilles et de la Guyane Ecole doctorale pluridisciplinaire.
- « Canne à sucre - CIRAD ». s. d. Consulté le 25 septembre 2018. <https://www.cirad.fr/nos-recherches/filieres-tropicales/canne-à-sucre/plante-et-usages>.
- Chabalier, P.-F, Virginie van de Kerchove, et Hervé Saint Macary. 2006. *Guide de la fertilisation organique à la Réunion*. Saint-Denis, Réunion: CIRAD.
- Chambre d'Agriculture de Martinique. s. d. « Fiche technique : Banane plantain ». Consulté le 27 juillet 2018. <http://doczz.fr/doc/2391321/banane-plantain---chambre-d-agriculture-de-martinique>.
- Chambre d'Agriculture d'Aquitaine. 2016. « F02-RotationEtAssolements.pdf ». Chambre d'Agriculture d'Aquitaine. http://www.pa.chambagri.fr/fileadmin/documents_ca64/AgricultureBio/OrganisationProduction/F02-Rotation_e_tAssolement.pdf.

- Chambre d'agriculture de M. 2018. « Fiche technique : Laitue ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- Chambre d'agriculture de Martinique. 2017. « Fiche technique : Chou vert ». Site institutionnel Martinique.
- . 2018a. « Fiche technique : Aubergine ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018b. « Fiche technique : BANANE EXPORT ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018c. « Fiche technique : Carotte ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018d. « Fiche technique : Concombre ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018e. « Fiche technique : Giraumon ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018f. « Fiche technique : Haricot vert ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018g. « Fiche technique : Igname ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018h. « Fiche technique : Melon ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- . 2018i. « Fiche technique : Tomate ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. <https://martinique.chambre-agriculture.fr/page-404/>.
- Chambre d'Agriculture Martinique. 2007. « Fiche technique : Canne à Sucre ». décembre 2007. <https://www.doc-développement-durable.org/file/Culture-canne-à-sucre/Canne à Sucre.pdf>.
- Chen G-H, et Weil R-R. 2010. « Penetration of cover crop roots through compacted soils ». *Plant and Soil*, n° 331.
- Chopart, J L, L Le Mézo, J L Brossier, et C L Hoareau. 2008. « Profondeur du système racinaire de la canne à sucre à la Réunion. » *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement*, octobre, 10.
- Comifer groupe azote-soufre. 2013. « Table des exportations azote ». COMIFER. <http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/Table%20des%20exportations%20azote.pdf>.
- Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée. 2013. *Calcul de la fertilisation azotée: guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : cultures annuelles et prairies*.
- Conseil régional de Guadeloupe. 2016. « Formulaire projet scientifique : AAP recherche collaboratif PO FEDER. »
- Cornet, Denis. 2005. « Etude du fonctionnement physiologique d'un couvert végétal d'igname (*Dioscorea alata* L.) ». Département de biologie végétale, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Delcombel E. 2005. « Organisation de l'action collective et rôle de la puissance publique pour le développement de l'agriculture guadeloupéenne, les difficultés du modèle collectif et de la conception entre acteurs ». Thèse de doctorat en économie, Laboratoire d'accueil CIRAD-TERA, Université Antilles Guyane, U.F.R de droit et d'économie de la Guadeloupe.
- Dinis, C, et N Wagner. 2005. « Manuel technique de la canne à sucre », CTIC'S Guadeloupe, , décembre, 94.

- Doyen, Cissé, Gourguet, Mouysse, Hardy, Béné, Blanchard, Jiguet, Pereau, et Thébaud. 2013. « Ecological-economic modelling for the sustainable management of biodiversity », *Computational Management Science*, Volume 10 (décembre): p 353–364.
- Dufrêne M, et Legendre P. 1997. « Species assemblages and indicator species : the need for a flexible asymmetrical approach. » *Ecological Monographs*, 67, 3. P.345-366.
- Dulcire M, et Cattan P. 2002. « Monoculture d'exportation et développement agricole durable : cas de la banane en Guadeloupe. » *Cahier agriculture* 11 (5). 313-321.
- Durand, Marie-Hélène, Anna Désilles, Patrick Saint-Pierre, Valérie Angeon, et Harry Ozier-Lafontaine. 2017. « Agroecological Transition: A Viability Model to Assess Soil Restoration: Natural Resource Modeling ». *Natural Resource Modeling* 30 (3): e12134. <https://doi.org/10.1111/nrm.12134>.
- Durand, Marie-Hélène, Sophie Martin, et Patrick Saint-Pierre. 2012. « Viabilité et développement durable ». *Natures Sciences Sociétés* 20 (3): 271-85. <https://doi.org/10.1051/nss/2012027>.
- Durand Maxime. 2013. « Effet des plantes de services sur la structuration du sol ». Mémoire de fin d'étude, CIRAD Guadeloupe, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II. http://agritrop.cirad.fr/572023/1/document_572023.pdf.
- Etudiants des spécialités :- Génie de l'environnement, option ADT- Productions Végétales, option IA. 2011. « Etude de la durabilité en exploitation agricole : Le domaine de Villarceaux ». Rapport de stage en fin d'étude. Agro Campus Ouest. <http://bergerie-villarceaux.org/uploads/PDF/rapport%20de%20la%20Bergerie%20de%20Villarceaux/rapport.Villarceaux.2011.pdf>.
- Feeney D. S., Crawford J. W., Daniell T., Hallett P. D., Nunan N., Ritz K., Rivers M., and Young I. M. 2006. *Three-dimensional Microorganization of the Soil–Root–Microbe System*. *Microbial Ecology*. 52.
- Grab, Institut Technique de l'Agriculture Biologique, et IBB InterBio Bretagne. 2005. *Fruits & Légumes Biologiques*. Rennes.
- Groupe de recherche et d'échanges technologiques, CIRAD, et Ministère des affaires étrangères. 2009. *Mémento de l'agronome*. Versailles]; [Paris: Ed. Quae ; GRET.
- Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, Rajendra Kumar Pachauri, et Leo A Meyer. 2015. *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat*. Genève (Suisse): GIEC.
- Han E., Kautz T., Perkons U., Uteau D., Peth S., Huang N., Horn R., and Köpke U. 2015. « Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method. » *Biology and Fertility of Soils*, n° 51: 847–856. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1032-1>.
- Heddadj, D. 2013. « Temps de travail en cultures », 6.
- Heymans, Diane. 2018. « Influence de la composition spécifique de couverts végétaux sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante : Étude des racines ». Mémoire de fin d'étude, laboratoire ECAV: Université catholique de Louvain. https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/en/object/thesis%3A14878/datastream/PDF_01/view.
- Houdart M, Bonin M, et Temple L. 2009. « Dynamique d'acteurs (agriculteurs et institutions) et innovation agroécologique pour la gestion des risques environnementaux en Guadeloupe ». *VertigO*. P.8.
- Iedom. 2017. « Guadeloupe rapport annuel 2016 ». P.180.

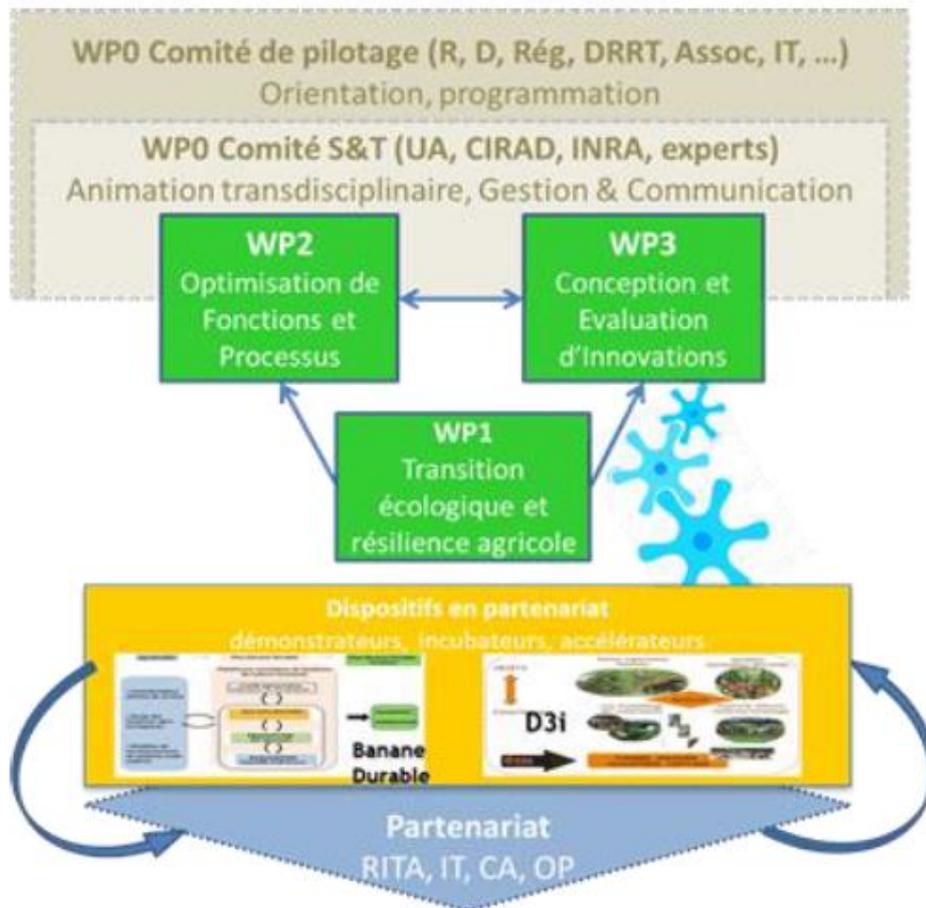
- « La fonte des semis : comment lutter contre ? » s. d. Binette & Jardin. Consulté le 27 juillet 2018. <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-289-fonte-semis-maladie-dessechement.html>.
- Lacointe, André, et Claude Zinsou. 1987. « Croissance et développement au champ de l'igname (*Dioscorea alata* L.) à partir de plants produits par culture in vitro ». *Agronomie* 7 (5): 331-38.
- Lamanda, Nathalie, Sébastien Roux, Sylvestre Delmotte, Anne Merot, Bruno Rapidel, Myriam Adam, et Jacques Wery. 2012. « A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration ». *European Journal of Agronomy* 38 (avril): 104-16. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.004>.
- Lassoudière, André. 2007. *Le bananier et sa culture*. Editions Quae.
- Laurens, Aude. 2008. « Etude spatialisée des flux et du bilan de l'azote en bananeraie enherbée : optimisation de la gestion du couvert et de la fertilisation par modélisation ». Mémoire et fin d'étude ingénieur agronome. CIRAD Martinique.
- « Les plantes sucrières – La culture de la canne à sucre ». s. d. Consulté le 27 juillet 2018. <http://www.lesucre.com/sucre-a-a-z/les-plantes-sucrieres/la-canne-a-sucre/culture-c4f9d3ab-b99c-4b99-96c8-be7383e8833f.html>.
- Lucien-Brun Maël. 2014. « Des Petites Régions Agricoles au Zonage Agroécologique : conception et construction d'un découpage spatial aux Antilles françaises ». Mémoire de fin d'étude ISTOM. INRA de Guadeloupe.
- Lusson, J-M., et D.Falaise. 2006. « Le bilan énergétique planète : Outil d'aide à la décision ». 2006. <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2009/09/Planete.pdf>.
- Marsden, Claire. 2014. « L'agriculture de conservation - Importance de la Matière Organique du Sol ». 2014. <http://www.supagro.fr/ress-pépites/AC/co/ImportanceMO.html>.
- Massenet Jean-Yves. 2012. « Propriétés physique du sol ».
- Messian Charles-Marie. 1997. *Le potager tropical*. Techniques vivantes. agence de la francophonie conseil international de la langue française.
- Meteo france. 2010. « Le climat en Guadeloupe ». 2010. http://www.meteofrance.gp/documents/3714888/5579049/Climat971_2pages.pdf/ae75b805-71d7-46de-99de-6f1e39b3068f.
- Meteo France. 2017. « Hauteurs de pluies annuelles (mm) en 2017. Ecart aux normales 1981–2010 ». 2017. <http://www.meteofrance.gp/documents/3714888/44655462/Pluies+annuelles+Guadeloupe+2017/dd006ac0-10af-4600-89b5-a495e58dc869>.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2016. « IDEA ». 2016. <https://idea.chlorofil.fr/>.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement rural, et Agence Canadienne de Développement International. s. d. « fiche_technique_carotte ». Consulté le 25 septembre 2018.
- Morlon, Pierre. 2018. « Assolement, rotation, succession, système de culture : fabrication d'un concept, 1750-1810 — Les Mots de l'agronomie ». 2018. https://loexplor.istex.fr/Wicri/Europe/France/InraMotsAgro/fr/index.php/Assolement,_rotation,_succession,_syst%C3%A8me_de_culture_:_fabrication_d%E2%80%99un_concept,_1750-1810.
- Mouysset L, Doyen L, et Jiguet F. 2014. « From Population Viability Analysis to Coviability of Farmland Biodiversity and Agriculture », *Conservation Biology*, volume 28 (janvier): 187-201.
- Munier-Jolain N, Deytieux V, Guillemain J.P, Granger S, et Gaba S. 2008. « Multi-criteria evaluation of cropping systems prototypes based on integrated weed management », *Innovations Agronomiques*, .

- Odeadom. 2014. « Plaquette diversification végétale ». 2014. http://www.odeadom.fr/wp-content/uploads/2014/10/Diversification_végétale_BAT.pdf.
- . 2016. *Programme portant sur les mesures spécifiques dans le domaine de l'agriculture dans les régions ultrapériphériques*. Vol. tome 1.
- Ozier-Lafontaine, Harry. 2012. « Viabilité et adaptation des écosystèmes productifs, territoires et ressources face aux changements globaux (Agro biosphère) 2012 Projet GAIA-TROP ». ANR. 2012. [http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-12-AGRO-0009](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-12-AGRO-0009).
- Paungfoo-Lonhienne C, Visser J, Lonhienne T, et Schmidt S. 2012. « Past, present and future of organic nutrients. Plant and Soil ». P.359.
- Peregrine, D. 2007. « Mobilisation des outils du diagnostic agraire dans une démarche d'évaluation ex ante d'innovations techniques ». Rapport de stage, Enita Clermont Ferrand.
- Periard-Larrivee Yann. 2012. « Irrigation spatio temporelle de la laitue romaine en sol organique ». Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval.
- Prévost Ph. 1990. *les bases de l'agriculture moderne*. Technique et Documentation Lavoisier.
- Pugeaux A. 2010. « Analyse-Diagnostic du Nord Basse Terre, Guadeloupe. » Mémoire de fin d'étude ingénieur agronome. Agro Paris Tech.
- Quénéhervé, Patrick. s. d. « Nématologie tropicale à la Martinique : de l'acquis à la prospective », 5.
- « Recensement agricole 2010 ». s. d. Consulté le 17 août 2018. <https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#z=113866,6607447,124994,76549;i2=stru1.nbexpl10;l=fr;i=stru1.saumoy10;v=map2>.
- Réseau agriculture durable. 2018. « Diagnostique de durabilité réseau civam ». 2018. <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2018/10/Guide-utilisateur-2018.pdf>.
- Rosenwal, Fabienne, et Yann Le-Chevalier. 2011. « La canne à sucre en Guadeloupe, en Martinique et à La Réunion ». *Agreste Primeur*, février 2011.
- Roudaut Jean-Philippe, Gaspard Myriam, et Boyer Gilles. 2011. *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon*. Chambre régionale d'agriculture du Languedoc Roussillon. Vol. tome 1. http://www.occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/GuidePO_Tome1_chapitre_8.pdf.
- Ruiz N. 2011. « Indice Biologique de la Qualité des Sols (IBQS) Bio -indicateur de la qualité des sols basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés ». Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre France-Nord. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/indice-biologique-qualite-sols-ibqs-2011.pdf>.
- Sabatier, Oates, et Jackson. 2015. « Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory », *Agricultural Systems*, volume 139 (octobre): Pages 76-81.
- Sebillotte M. 1990. « Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. » *Les systèmes de culture*. <https://prodirna.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:94106>.
- Siegenthaler Georges. s. d. « Le sol de la vigne ». Consulté le 20 septembre 2018. <http://www.mondeuse.fr/docs/le-sol-la-vigne.pdf>.
- Solagro. 1994. « Dialecte ». 1994. <http://dialecte.solagro.org/>.
- Stehlé, Henri. 1956. « Les insectes nuisibles à la canne à sucre. Leurs parasites naturels et la lutte biologique aux Antilles françaises ». *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 3 (1): 60-81. <https://doi.org/10.3406/jatba.1956.2286>.

- Taglioni, François. 2006. « Les petits espaces insulaires face à la variabilité de leur insularité et de leur statut politique, Small insular spaces in relation to the variability of their insularity and their political status ». *Annales de géographie*, n° 652: 664-87. <https://doi.org/10.3917/ag.652.0664>.
- Tayeb Ameziane El Hassani. 1995. *Agronomie moderne*. Universités francophones. Hatier - aupelf . UREF.
- Tichit, Muriel, Bernard Hubert, Luc Doyen, et Didier Genin. 2004. « A viability model to assess the sustainability of mixed herds under climatic uncertainty ». *EDP Sciences*, page 405-417. <https://doi.org/10.1051/animres:2004024>.
- Tindo M, Tagne A, Mpe J-M, Ayodele M, et Ndikontar A. s. d. « Guide technique sur les nuisibles de la banane plantain, le maïs, le manioc et la tomate. » *FAO*, 89.
- Tolale, E, Yongue-Fouateu, et Boli Baboule. 2008. « Potentiel et effets des résidus de culture de canne à sucre pour la conservation des sols ferrallitiques d'une exploitation agricole de la région de Mbandjock (sud Cameroun) ». *Etude et Gestion des Sols*, 18.
- Valérie Angeon, Samuel Bates, Eduardo Chia, Jean-Louis Diman, Audrey Fanchone, Harry Ozier-Lafontaine, et Patrick Saint-Pierre. 2014. « Détermination des contraintes de viabilité des exploitations agricoles : application aux Antilles françaises ». ANR, INRA, Université Antilles-Guyane.
- Vedie, Hélène. 2011. « Les apports de matières organiques », 8.
- Verhallen, Anne, et Elaine Roddy. 2009. « Irrigation des cultures légumières ». Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales.
- Williams S. M., and Weil R. R. 2004. « Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop ». *Soil Science Society of America Journal*, n° 68: 1403–1409. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>.
- Zebus M-F. 1999. « Paysannerie et économie de plantation, Le cas de la Guadeloupe 1948-1980 ». *Ruralia*. P.5 , p.24.

Annexes

Annexe 1 : Organigramme du projet AgroEcoDiv.



Source : (Conseil régional de Guadeloupe 2016)

Annexe 2 : L'histoire de l'agriculture en Guadeloupe.

L'histoire agricole de la Guadeloupe commence à partir de la découverte de l'île par Christophe Colomb en 1493. Les premiers habitants de l'île étaient les indiens Arawak, qui vivaient essentiellement de la pêche et de la **culture de manioc**, qu'ils avaient apportés avec eux de la région amazonienne. Vers 850, les indiens Caraïbes, un peuple guerrier, envahissent l'île et s'y installent jusqu'à sa découverte par les européens au début de la colonisation. Ils donneront leur nom à cette région.

La colonisation ne commence qu'à partir de 1635 sous l'impulsion de Richelieu. Les premiers temps sont difficiles, du fait de la résistance des indiens caraïbes et du manque d'approvisionnement. En 1641, les indiens caraïbes acceptent de quitter la Guadeloupe et s'installent en Dominique, la colonisation commence alors réellement. La première culture à être implantée est le **tabac**, mais du fait de la forte concurrence venant des Amériques, son commerce décline rapidement. D'autres cultures comme le **coton** et l'**indigo** se développent à cette époque. Aujourd'hui encore, il est possible d'observer des bassins de décantation pour la teinture indigo sur l'île de Marie Galante. (Abenon, L.-R. 1992)

Avec les débuts de la traite négrière et l'installation des premiers esclaves africains, la culture de la **canne à sucre** se met en place progressivement. En 1654, l'arrivée des Hollandais qui quittent le Brésil apporte de la main d'œuvre et des connaissances nécessaires à la culture de la canne à sucre. Progressivement, la production s'organise autour de ce que l'on appelle des **habitations sucrières**. Ces dernières sont détenues par les grands colons ; des aristocrates ou des bourgeois, qui sont les seuls à posséder le capital financier nécessaire à l'installation. Les habitations sont de grandes propriétés d'environ 140 ha et 80 esclaves, où se font à la fois la production de canne et sa transformation. Les **habitations caféières et cacaoyères** sont de plus petite taille, et sont des productions secondaires (Peregrine, D 2007). Ces trois productions sont destinées à l'export. Dans le même temps, les « petits blancs » et les hommes de couleurs libres peuvent produire des **cultures vivrières** destinées au marché local.

A partir de 1685, les propriétaires des habitations doivent fournir de la nourriture à leurs travailleurs. Cette loi est rarement respectée, mais le samedi est laissé libre pour que les esclaves puissent faire leur potager. Les **jardins d'esclave** se développent alors. Cette pratique est à l'origine de ce que l'on appelle aujourd'hui les **jardins créoles**, dans lesquels sont produits un grand nombre de cultures ; maraichères, vivrières et médicinales. (Abenon, L.-R. 1992)

En 1794, avec la première abolition de l'esclavage, la main-d'œuvre manque dans les champs de canne à sucre, c'est le début du déclin des habitations sucrières. C'est également à cette période (environ 1800), que sont plantés les premiers plants de **bananiers**, utilisés pour faire de l'ombrage aux cultures de café et cacao.

Le 18 Brumaire, Napoléon Bonaparte devient empereur, il décide de relancer la culture de canne à sucre. L'esclavage est également réinstauré jusqu'en 1815, date du traité de Vienne qui stipule l'interdiction de la traite négrière. Il faudra attendre 1848 pour que l'esclavage prenne définitivement fin en Guadeloupe. Le fonctionnement en habitation sucrière est terminé. La production et la transformation sont dissociées, les cannes sont directement apportées à des usines centrales pour y être transformées. (Abenon, L.-R. 1992)

En 1899, un cyclone affecte gravement la Guadeloupe, les békés martiniquais (un béké est un habitant créole à la peau blanche de la Martinique et de la Guadeloupe, descendant des premiers colons européens) et des investisseurs métropolitains rachètent une grande partie des usines de transformation de la canne. La baisse des prix du sucre due à la concurrence du sucre de betterave affecte fortement la production guadeloupéenne. C'est un cyclone en 1928 qui sonne le glas de la grande période de production sucrière. La Guadeloupe se tourne alors vers la production de **bananes d'export**. Entre 1930 et 1938 la surface de bananeraie augmente fortement en Basse Terre. En 1946

la Guadeloupe devient un Département Français d'Outre-mer (DOM). La Guadeloupe voit l'arrivée de richesses et de personnes avec un haut pouvoir d'achat ; la demande locale augmente. La production bananière se mécanise, ce qui pousse l'installation des bananeraies vers la région de Capesterre Belle-Eau, plus plate que les flancs de montagnes de Basse-Terre.

La réforme foncière de 1961 avait pour objectif de faciliter l'accès à la terre pour les petits producteurs, d'augmenter la surface moyenne des exploitations et de **favoriser la diversification de la production**. Une partie de la terre des usines a été vendue (Zebus M,F 1999). Cela aboutit à environ 3 000 agriculteurs installés sur 10 000 ha de terre (Delcombel E 2005). Cette réforme présente un **bilan mitigé** : un certain nombre de terres agricoles sont perdues au profit de l'urbanisation et la diversification de l'appareil productif n'a pas été observée, du fait d'une absence de politique régionale d'accompagnement des agriculteurs (Pugeaux A 2010).

En 1981, une nouvelle réforme foncière a lieu en Guadeloupe, cette fois **en soutien à la filière canne**, par le développement de petites et moyennes exploitations. Les usines sucrières étant en difficulté, elles font appel à de la main d'œuvre étrangère haïtienne, moins coûteuse et illégale. La réforme foncière de 1981 est là pour renforcer la pérennisation de la production sucrière. Les Groupements Fonciers Agricole (GFA) sont créés en 1985. Cela assure des baux de longue durée aux agriculteurs sans qu'ils ne s'endettent (Pugeaux A 2010). **Les grandes propriétés deviennent minoritaires au profit d'une agriculture composée principalement de petites et moyennes exploitations agricoles** (Delcombel E 2005).

En 1989, le cyclone Hugo provoque une **crise de la filière banane**, suivie par le scandale sanitaire dû à l'utilisation de la chlordécone. (Marie Bezar, 2017). La forte concurrence sur le marché et la diminution des subventions européennes, accentuent la crise de la banane d'export.

Le retrait d'un certain nombre de molécules nocives pour l'environnement et pour la santé humaine est une contrainte supplémentaire à laquelle doit faire face la filière bananière (Houdart m, Bonin M, Temple L 2009). Cette culture est onéreuse car gourmande en intrants. En effet, les nouveaux produits phytosanitaires utilisés sont plus respectueux de l'environnement mais moins efficaces et plus onéreux. Les forts taux d'investissement nécessaire au fonctionnement de cette filière, rendent parfois **la viabilité économique difficile**. **La transmission des exploitations peut également poser problème**(Dulcire M et Cattan P 2002).

Les deux principales cultures d'exportation produites historiquement en Guadeloupe sont la canne et la banane, comme évoqué précédemment. Dans les années 1975-1980, le gouvernement souhaitait aller dans le sens d'un développement du territoire guadeloupéen, car il existe une différence de niveau de vie entre la Guadeloupe et la métropole. Le modèle agro-exportateur de monoculture de la banane et de la canne va être étendu à d'autres productions **Des coopératives** sont créées pour organiser la filière de diversification et redistribuer les fonds publics aux filières de productions (Delcombel E 2005).

Les aides européennes accordées aux régions ultrapériphériques de l'Europe, dont font partis tous les DOM comme la Guadeloupe, sont accordées sous condition de faire partie d'un **collectif de producteurs reconnu par l'état**. (ODEADOM 2016). La répartition des aides POSEI montre une grande disparité entre les filières. En effet le secteur de la banane, principale culture d'exportation, canalise 46.2% des aides ; la filière canne à sucre en touche 26.2% ; l'élevage 12.7%, alors que les productions végétales pour la diversification n'en touchent que 8.4% (AGRESTE 2017). Cette disparité peut être expliquée par le manque d'adéquation entre les critères d'attribution et le manque l'organisation de la filière de diversification par les cultures végétales.

Les **cultures de diversification** sont davantage tournées vers le **marché local** que vers l'exportation, la distribution des aides est peu adaptée à cette configuration. Les aides POSEIDOM ne peuvent être touchées par les producteurs que s'ils sont regroupés en Sociétés d'Intérêt Collectif Agricole (SICA) et s'ils ont reçu l'agrément d'Organisation de Producteurs (OP) (Delcombel E 2005). Un grand nombre d'OP pour les cultures de diversification a été créée depuis 30 ans, mais aucune n'est encore existante. Aujourd'hui, il existe quatre coopératives qui ont le statut d'OP, regroupées sous le nom de IGUAFLHOR. Elles totalisent seulement 127 producteurs, soit **2% d'entre eux**. Cela signifie qu'un

grand nombre de producteurs ne peuvent pas toucher les aides POSEIDOM (ODEADOM 2016).

Annexe 3 : Contexte pédoclimatique de la Guadeloupe

Le périmètre d'étude pour ce travail de 6 mois se restreint au territoire guadeloupéen. Un grand nombre de caractéristiques agronomiques relatives aux successions culturales est commun à l'ensemble des îles des Antilles Françaises, cela nous permet donc de travailler à l'échelle de la Guadeloupe, qui est un territoire représentatif des problématiques communes aux Antilles françaises.

L'archipel Guadeloupéen est composé de **3 îles habitées**, la Guadeloupe avec la Grande Terre au nord-est et la basse terre au sud-ouest, les îles des Saintes au nord, Marie Galante et La Désirade à l'est. Le plus grand nombre d'exploitations agricoles se trouve sur **la Grande et la Basse Terre de Guadeloupe**, avec respectivement 3760 et 2279 exploitations agricoles. Marie Galante est occupée par 1710 exploitations alors que La Désirade n'en a que 53 et Les Saintes 2. Nous nous intéressons donc davantage à La Grande et la Basse Terre qui concentrent quasiment les 4/5 des exploitations de Guadeloupe. (« Recensement agricole 2010 »).

Le contexte climatique tropical de la Guadeloupe est caractérisé par **deux saisons**, une saison sèche et une saison humide. Voir l'annexe 4 qui présente le diagramme ombrothermique d'une région de Guadeloupe. La saison sèche aussi appelée « **carême** » s'étend sur la période allant de janvier à avril, les alizés (vent régulier soufflant d'est en ouest) sont constants, le temps est sec et ensoleillé avec quelques averses la nuit et des températures fraîches. La **saison humide** s'étend de Juillet à Octobre, le temps est chaud et humide, c'est la période la plus favorable pour la formation d'ondes tropicales et de cyclones, les épisodes de pluie sont abondants, les alizés sont plus faibles, le temps est lourd et orageux en journée. La première transition entre ces deux périodes s'effectue entre mai et juin. Les averses y sont fréquentes et les températures sont en hausse. La seconde période de transition se situe entre Novembre et Décembre. Les pluies diminuent, les alizés recommencent à souffler et les températures baissent. Le cycle annuel des températures moyennes présente une faible amplitude 2 à 3 °C pour les minimales et 3 à 4 °C pour les maximales (Météo France, 2017).



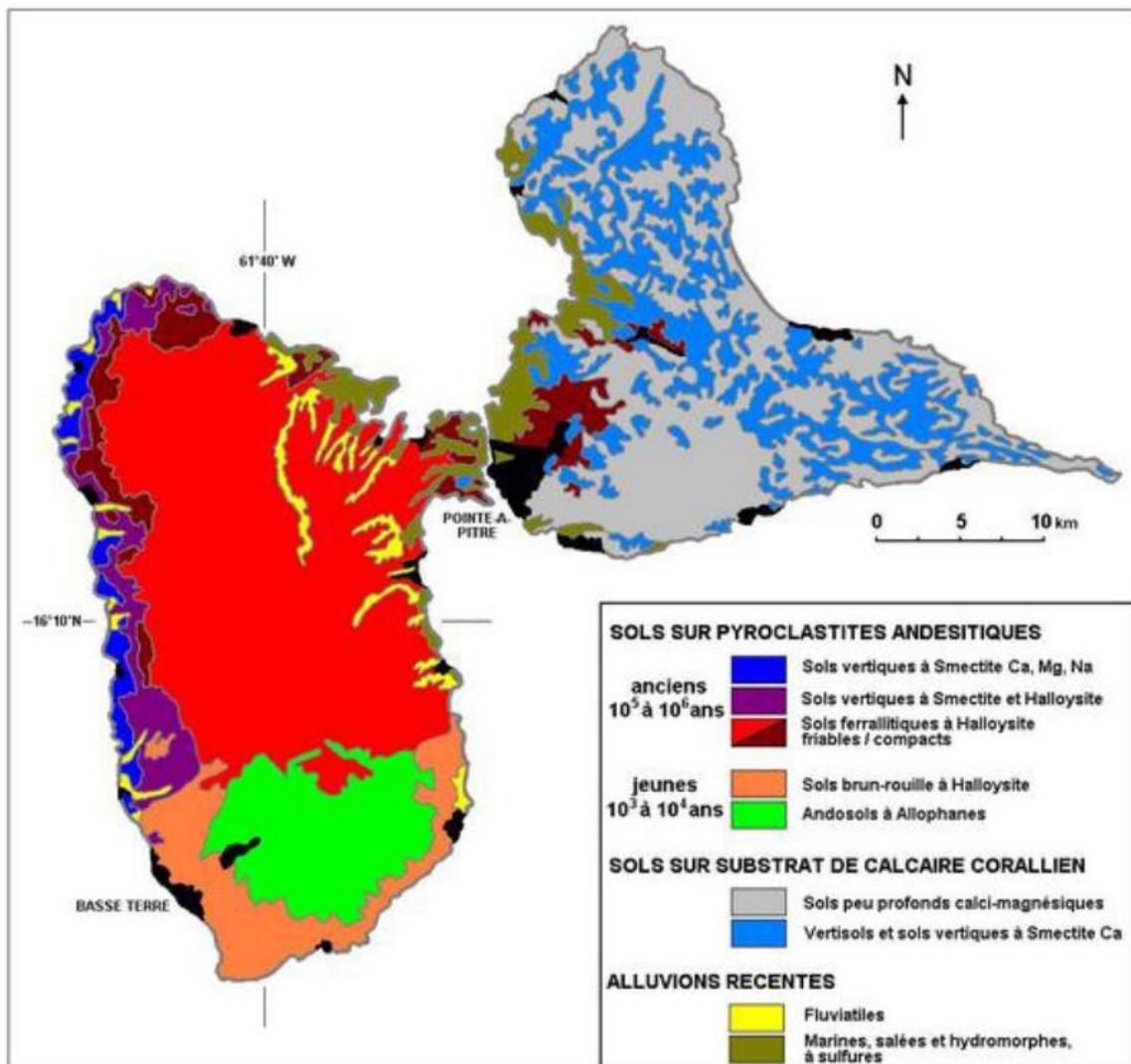
Les saisons en Guadeloupe. Source : (Meteo france 2010)

Les caractéristiques des deux principales îles de la Guadeloupe sont les suivantes :

- **La Basse Terre** est caractérisée par une origine volcanique relativement **récente** (la dernière éruption volcanique de La Soufrière date de 1976). La topographie est marquée par les pentes qui sont supérieures à 20% sur le massif de la soufrière (LUCIEN BRUN Maël 2014). Une chaîne de montagnes traverse la basse terre du nord au sud, se terminant par La Soufrière qui culmine à 1467 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat est **humide** et les précipitations sont plus importantes que sur la Grande Terre , le gradient de précipitations varie entre 1478mm et 7715mm par an pour l'année 2017 (Meteo France 2017). Voir en annexe 5, la carte de pluviométrie. Sur la basse terre il est possible de **distinguer deux sous unités territoriales**, la côte sur le vent (côte atlantique à l'est) et la côte sous le vent (côte caraïbe à l'ouest) qui ne reçoivent pas les mêmes précipitations. Les effets orographiques et de Foehn, expliquent les précipitations plus importantes en côte sur le vent, et les plus faibles en côte sous le vent. Du fait des différents climats évoqués précédemment, la **diversité des sols** est importante en Guadeloupe. La basse terre est constituée de sols sur pyroclastites andestiques (origine volcanique récente) avec des sols plus ou moins jeunes, principalement des sols ferrallitiques à halloysites friables et compacts et des andosols à allophanes. (Cabidoche, Y.-M. 1997). Voir en annexe 3 la carte pédologique de la Guadeloupe.
- **La Grande Terre** en revanche fait partie de l'arc caraïbéen externe tout comme la Désirade et Marie Galante. Leurs origines volcaniques sont plus **anciennes**, le socle volcanique inactif s'est enfoncé sous le niveau de la mer, des bio détritiques de squelettes de coraux et d'algues se sont accumulés formant des plateaux calcaires d'une hauteur pouvant atteindre 120m en

certaines points (Cabidoche, Y.-M. 1997). La topologie y est moins haute et beaucoup plus **plate**, seule la région des grands fonds est d'avantage vallonnée. Les précipitations y sont également moins importantes du fait de l'absence de hauts reliefs. Le gradient de précipitations varie entre 1257mm et 1837mm par an pour l'année 2017(Météo France 2017). Le climat y est plus **chaud et sec** qu'en basse terre. Du fait de son origine volcanique plus ancienne que celle de la basse terre et du fait de son climat, la Grande Terre a des sols sur substrat calcaire corallien. Les deux principaux sols sont des sols peu profonds calcimagnésiques et des vertisols et sols vertiques à Smectite Ca. (Cabidoche, Y.-M. 1997)

Annexe 4 : Carte pédologique simplifiée de la Guadeloupe.



Source : (Cabidoche, Y.-M. 1997)

Annexe 5 : Diagramme ombrothermique - Station du Raizet, Guadeloupe

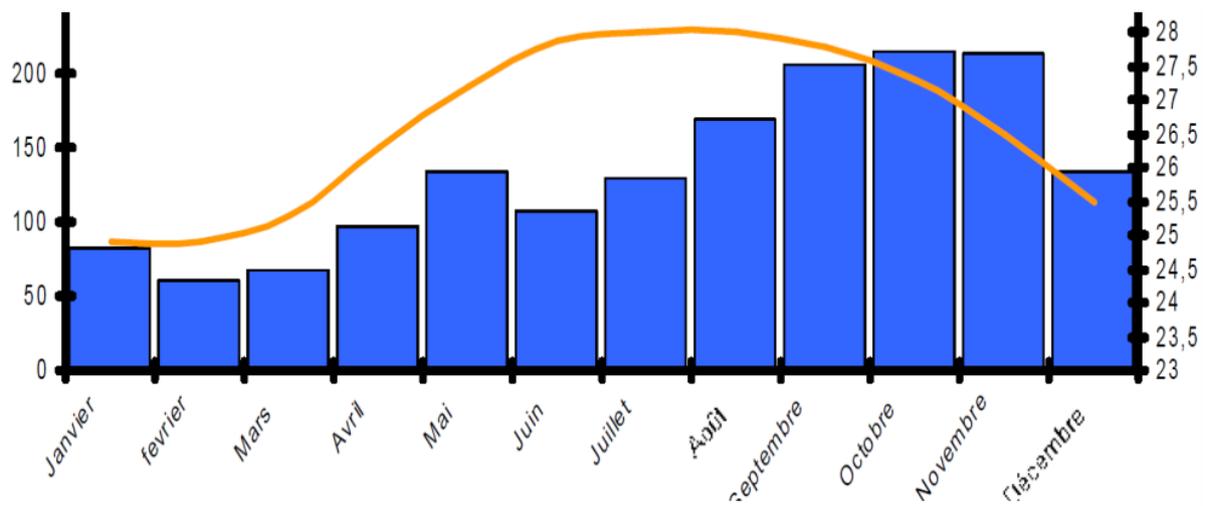
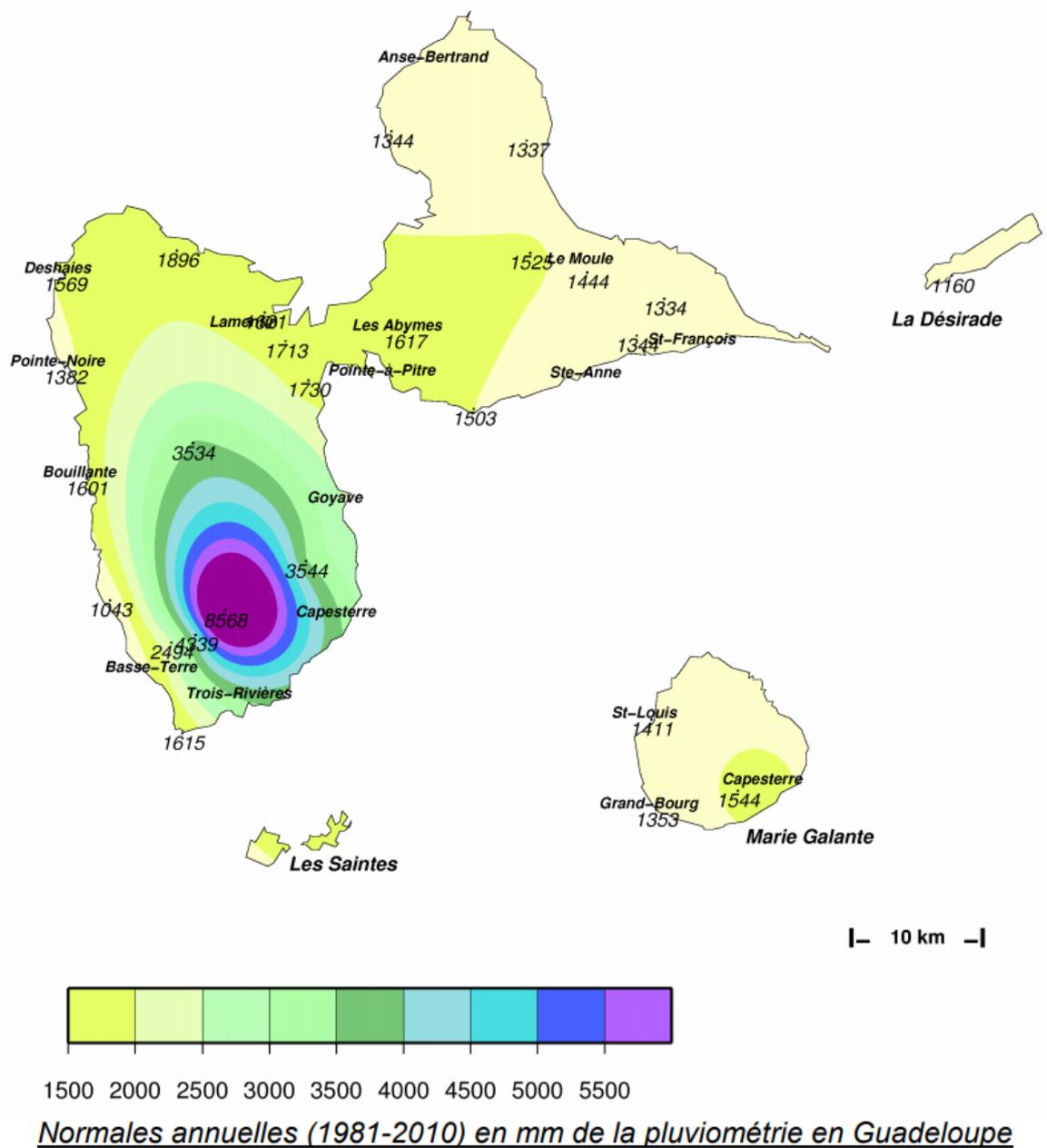


Diagramme ombrothermique (températures et pluie) à Les Abymes Le Raizet

Source : (Meteo france 2010)

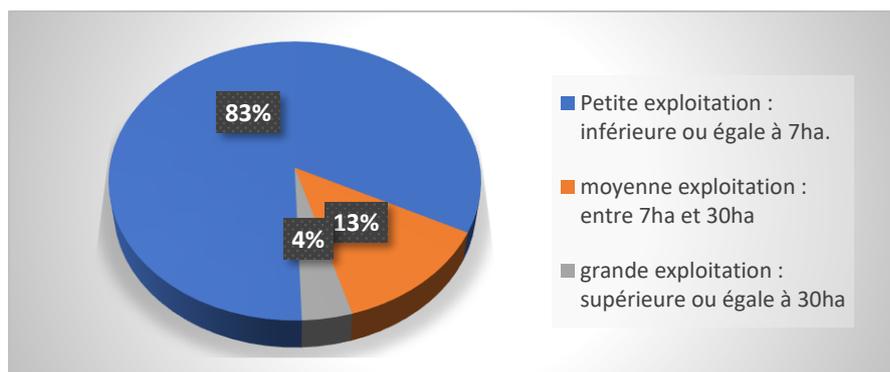
Annexe 6 : Carte pluviométrique de la Guadeloupe, normales annuelles entre 1981 et 2010 en mm.



Source : (Meteo france 2010)

Annexe 7 : Structure des exploitation agricole Guadeloupéenne

La taille des exploitations a fortement évolué depuis l'apogée de la culture sucrière et avant les réformes foncières de 1961. Le paysage agricole guadeloupéen est, aujourd'hui fragmenté avec un **grand nombre de petites exploitations agricoles** de 3ha en moyenne ce qui représente 83% des exploitations, la moitié de la surface agricole et 55% des travailleurs dans le domaine de l'agriculture. Les exploitations agricoles moyennes ont une superficie comprise entre 7ha et 30ha, elles représentent 13% des exploitations agricoles. Les grandes exploitations quant à elles ont une superficie supérieure à 30ha et représentent seulement 4% des exploitations agricoles. (IEDOM 2017)



Répartition du nombre d'exploitations guadeloupéennes en pourcentage en fonction de leur taille en 2017, IEDOM 2017.

Les terres cultivées par les agriculteurs peuvent être de **différentes origines** : achat, héritage, location, grâce à une adhésion à un GFA ou par accord implicite d'occupation de terre de la famille ou de voisins. Les exploitations sont majoritairement tenues par un **chef d'exploitations individuels**, c'est le cas pour 96% des exploitations. La main d'œuvre est composée par le chef d'exploitation qui a le plus gros poste des UTA avec 57%, des employés permanents (22%), de la main d'œuvre saisonnière (10%) et la famille (10% des UTA). (AGRESTE 2015).

- Les productions de diversifications végétales destinées au marché local

Les produits de diversifications représentent **une grande diversité de production** et de système de production : les filières fruits et légumes, horticoles, plantes aromatiques, les plantes à parfum et stimulantes (café), etc. En Guadeloupe, 1 900 agriculteurs produisent des légumes frais, principalement en plein champ. La taille des exploitations se situe entre **1 et 5 ha**. Elles occupent en moyenne 20 % de la SAU. La production est majoritairement écoulee sur le **marché local**, seule la production de melons est expédiée vers l'Europe continentale avec le même type de système que celui des bananes destinées à l'export. La Guadeloupe est autosuffisante en tomate, concombre, salade et melon. Le taux de couverture des légumes est en moyenne de 60 %, mais atteint plus de 80 % pour les légumes produits localement. **Quatre organisations de producteurs** sont présentes sur le territoire et permettent notamment, la distribution des aides POSEI. Le contexte insulaire tropical et ultramarin font de la filière de diversification, une **filière difficile** car accumulatrice de plusieurs handicaps. Le contexte insulaire induit des **coûts de transport** importants pour l'importation des matières premières et pour l'export. Il est difficile de valoriser les produits par rapport à la concurrence étrangère. Le contexte tropical accentue la **vulnérabilité** des activités agricoles aux facteurs environnementaux (cyclone, sécheresse pendant le carême). La Guadeloupe est une Région Ultrapériphérique (RUP) elle bénéficie donc d'une garantie de sécurité des aliments et de préservation de l'environnement, par l'Europe mais l'étroitesse du marché des cultures de diversification n'incite pas l'Europe à investir dans cette filière. (ODEADOM 2014).

Annexe 8 : Fiche techniques des caractéristiques agronomique de chaque spéculation.

- **Canne à sucre : Saccharum officinarum**

Famille botanique : Gaminées

Maladies souvent associées : Il existe **trois types de maladies** susceptibles d'affecter la canne. Certaines sont provoquées par **un champignon** comme le mildiou, le charbon, la morve rouge ou la rouille (peu d'incidence), d'autres par **des bactéries** (la gommose, l'échaudure et le rabougrissement des repousses). D'autres encore viennent de **virus** : la mosaïque, la maladie de Fidji et les stries chlorotiques. Maladie peu présente sur le territoire guadeloupéen, sauf la rouille brune.

Parasites : vers blancs, pucerons, cochenilles, et surtout "borers" qui vivent aux dépens de la plante. Pour les combattre, les hommes utilisent essentiellement les solutions biologiques (développement d'insectes parasites des larves de borers), chimiques (pesticides) et génétiques (création de variétés résistantes à ces parasites).

Fertilisation nécessaire : N 120 / P 80 / K 160 . Fumure d'entretien chaque année dans le rang sur les rejetons. Amendement 3 à 4 t/ha/an de chaux magnésienne ou calcaire broyé selon le type de sol (si pH inférieur à 5) en tête de plantation, à répandre sur le sol avant affinage.

Impact sur le sol en fin de culture : Permet de décompacter le sol car les rhizomes sont profonds. Effet bénéfique sur la structure du sol. Fort apport de matières Organiques (résidu de culture).

Période de culture : La canne est une plante vivace, après chaque coupe elle repousse spontanément. La perte de vigueur et de productivité induit l'arrachage des cannes au bout de 4 ou 6 ans.

Temps de non-retour : peut-être plantée directement après l'arrachage, après un travail du sol pour enfouir les résidus de culture. En juin-juillet sur Basse Terre / En aout-Septembre sur Grande Terre.

Remarque Agronomique : avec l'amélioration variétale, peu de problèmes de ravageurs. Seuls problèmes rongeurs si la culture est mal entretenue (adventice, pas de campagne de dératisation). Souvent mise en tête de rotation pour purifier les sols.

Besoin irrigation les premiers mois, une fois lancé jusqu'à la maturation besoin en eau faible. Aide très importante venant de l'état : aide à la plantation du moment que le producteur soit identifié comme producteur. Aide à la production proportionnelle au tonnage pour la production de sucre et pour la distillerie.

Source :

(Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017a), (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017c), (Chambre d'Agriculture Martinique 2007), (Fabienne Rosenwald, Yann Le Chevalier 2011), (Stehlé 1956), (« Les plantes sucrières – La culture de la canne à sucre » s. d.), (C.Dinis et N.Wagner 2005).

- **Banane plantain : *Musa xparadisiaca* (variété blanche : corne, sans livre)**

Famille botanique : Musaceae, c'est une herbe géante.

Maladies souvent associées : La cercosporiose noire du bananier. Champignon qui attaque les feuilles, sa propagation se fait sur de très grande distance, entraîne de fortes baisses de rendement. D'où l'importance d'éviter les monocultures trop longues temporellement.

Parasites : Le charançon noir du bananier, les nématodes sont importants dans les sols au niveau des racines. Ils causent le dépérissement de ces racines entraînant de ce fait la chute des plants. Les charançons provoquent des galeries dans les bulbes. Les trips piquent les fruits et les déprécient.

Fertilisation nécessaire : Les engrais sont principalement : l'azote (N) 300, le potassium (K)600, le phosphore (P)150, le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Fertilisant organique (fientes, compost...) avec engrais chimique azoté, potassique, NPK, classique et potassique.

Impact sur le sol en fin de culture : risque de contamination par les nématodes. Apport de Mo par les résidus de cultures.

Période de culture : Reproduction des plants grâce aux rejets pendant 2 années maximum car reproduction par rejet baïonnette, les plants ne sont pas assainis. Ce pendant la technique PIF : Plant Issus de Fragments de tiges, permet une reproduction saine.

Temps de non-retour : Il est recommandé de maintenir le sol sans bananes pendant au moins 1 an. Rotation avec cannes ou autres cultures possibles.

Remarque Agronomique : producteur a goyave en agroécologie en association avec d'autres cultures. La consommation est faible et principalement produit par les haïtiens.

Corne : plus résistante a la sécheresse

Sans livre : régime avec plus de main avec régime plus de 50kg.

Source :

(Marie Bezard 2017), (Chambre d'Agriculture de Martinique s. d.), (M.Tindo, A. Tagne, J. M. Mpe, M. Ayodele et A. Ndikontar, s. d.)

- **Banane export Cavendish : Musa acuminata**

Famille botanique : Musaceae Diverse

Maladies souvent associées : La cercosporiose noire et jaune du bananier. Champignon qui attaque les feuilles, sa propagation se fait sur de très grande distance, entraîne de fortes baisses de rendement. D'où l'importance d'éviter les monocultures trop longues temporellement.

Parasites : nématode, charançon provoque des galeries dans les bulbes, trips piquent les fruits et les déprécient et araignées rouges attaquent des feuilles de bananes. Araignée rouge suce les feuilles et les dessèchent en période plutôt sèche.

Fertilisation nécessaire : N 450 , P 150, K 1250, CaO 260, MgO 160.

Impact sur le sol en fin de culture : risque de contamination par les nématodes. Apport de Mo par les résidus de cultures.

Période de culture : Reproduction des plants grâce aux rejets pendant **5 ans** Puis utilisation de vitro plant sélectionné génétiquement.

Temps de non-retour : jachère de 1 a 2 ans, ou rotation avec de la canne de 3 ans (pour pouvoir toucher les aides, ils ne sont pas obligés de faire les 5 ans).

Remarque Agronomique : souvent avec plante de couverture, (plante nematofuge : crotalaire).

Source :

(Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017d), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018b).

• **Igname : Dioscorea (espaisse : alata /rontondata/ esculenta / bulbifera/trifida)**

Famille botanique : Dioscoreacees

Maladies souvent associées : **Anthracnose** sur les feuilles et les tiges, provoque des taches nécrotiques jaune-brune. Se conserve dans les tubercules pour y remédier il est recommandé de faire des mélanges variétaux, de plantation en barrière (perpendiculaire au sens du vent) et de limiter l'humidité. *Phyllosticta* est un champignon qui attaque les feuilles et les tiges et provoque des baisses de rendement.

Parasites : Différents coléoptères qui perforent les tubercules. Les nématodes provoquent le fendillement, la nécrose et la pourriture des tubercules.

Fertilisation nécessaire : approximatif : N 100/150, P 80/100, K 150/200. Possible de faire un amendement chimique à la chaux magnésienne et organique avec du fumier. Apport de matière organique avec un démarreur minéral.

Impact sur le sol en fin de culture : Rotation recommandée : igname après jachère ou pâturage ou canne ou sorgho. Eviter de faire se succéder les cultures d'ignames.

Période de culture : un cycle de culture de 5 à 10 mois, replanter pour chaque période de culture.

Temps de non-retour : au moins 2 a, rotation ou jachère recommandée.

Remarque Agronomique : Culture complexe extrêmement dynamique des types de sol et des ^réparation de sol préalable.

Rotondata cayenensis : inerrante à la photo-période

Alata : mise en place une fois sorti de la dormance vers fin mars – avril. Après le mois d'aout la production est moindre après que la tubérisation se fait mal. Forte production de bulbille pour les séances.

Trifida : cycle long 11 mois, problème de virose, limite la production

Bulbiera : faible production, par variété ancienne. Production aérienne importante.

Source :

(Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017c), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018g).

- **Carotte : *Daucus carota***

Famille botanique : Umbellifères

Maladies souvent associées : L'alternariose est une maladie due à un champignon pouvant se reproduire à partir des résidus de culture dans le sol. Son développement est favorisé par l'humidité sur les feuilles. Provoque des taches nécrotiques brunes. *Sclerotium rolfsii* est un champignon provoquant pourriture blanchâtre sur les feuilles et les tiges. L'oïdium entraîne la formation d'un duvet blanchâtre sur les feuilles. La septoriose touche également la carotte et la laitue en faisant des taches grises et noires sur les feuilles.

Parasites : criquet, fourmis vers gris, nématode à galle (sur les racines).

Fertilisation nécessaire : besoin en Azote (N) 100, Phosphore (P) 80, Potassium (K) 200. Plante sensible aux carences en magnésium et en oligo-éléments. Mandement possible : 0,5 à 2 T/ha/an de chaux magnésienne.

Impact sur le sol en fin de culture :

Période de culture : semis de septembre à décembre puis récolte 3 à 4 mois plus tard. Plante annuelle à replanter chaque année de culture.

Temps de non-retour : peut-être planté chaque année en rotation avec d'autres cultures pour limiter la prolifération des pathogènes dans le sol.

Remarque Agronomique :

Source : (Chambre d'agriculture de Martinique 2018c).

- **Haricot vert : Phaseolus vulgaris**

Famille botanique : Fabacées

Maladies souvent associées : Oïdium, anthracnose, Sclerotium, viroses (Recroquevillement et décoloration des feuilles)

Parasites : Les pucerons déforment les feuilles. Les cicadelles provoquent une déformation et un assèchement des feuilles. Les thrips altèrent l'épiderme des feuilles et les chenilles mangent les feuilles.

Fertilisation nécessaire : Azote (N) 60, Phosphate (P) 90, Potassium (K) 120. Amendement chimique avec de la chaux magnésienne (1.5 à 2 Tonnes par hectare).

Impact sur le sol en fin de culture : résidu de culture important : apport de mo. Possibilité de nodulation fixation N₂. (Gérer l'azote avec parcimonie)

Période de culture : Semé toute l'année et récolté 5 à 6 semaines après.

Temps de non-retour : ne pas replanter juste après, intercaler au moins une autre culture à cycle suffisamment long pour éliminer les pathogènes du sol. Possibilité de faire 2 cycles par an.

Remarque Agronomique :

Source : (Chambre d'agriculture de Martinique 2018f).

- **Chou vert : Brassica oleracea**

Famille botanique : Crucifères

Maladies souvent associées : oïdium et mildiou.

Parasites : puceron, aleurode, chenille.

Fertilisation nécessaire : Culture exigeante en soufre, magnésium et matière organique et particulièrement sensible aux carences en oligo-éléments - pH situé entre 6,5 et 7,5. Azote (N) 150, Phosphate (P) 100, Potassium (K) 300. Amendement organique et chimique possible.

Impact sur le sol en fin de culture :

Période de culture : se plante toute l'année et se récolte 90 à 120 jours après plantation.

Temps de non-retour : ne pas replanter directement après, attendre au moins une culture intercalaire dans la rotation.

Remarque Agronomique : Plante sensible à la toxicité manganique (battement de nappe : nappe remonte, nodule Ferro-manganique)

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2017)

- **Aubergine : Solanum melongena**

Famille botanique : solanacée

Maladies souvent associées : Anthracnose, flétrissement bactérien, phytophthora

Parasites : Les acariens déforment et épaississent les feuilles, thrips, aleurodes Larves noires recouvertes de filaments cireux blancs à la face inférieure des feuilles.

Fertilisation nécessaire : Azote (N) 300, Phosphate (P) 150, Potassium (K) 400, Magnésium (MgO) 80. Amendement chimique et organique possible.

Impact sur le sol en fin de culture :

Période de culture : se plante de septembre à novembre et est récolté 2 mois plus tard.

Temps de non-retour : faire au moins une culture intercalaire

Remarque Agronomique : Sensibilité au flétrissement bactérien, à l'anthracnose et aux attaques de thrips. Période hivernage non favorable à la culture car développement de maladie fongique.

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018a)

- **Tomate : Solanum lycopersicum**

Famille botanique : solanacées

Maladies souvent associées : (Cul noir ou nécrose apicale entraîne des taches noires à la base du fruit du a un manque de calcium, on ne la considère donc pas comme une maladie).

Flétrissement bactérien, erwinia : pourriture molle de la tige, gale bactérienne, **begomovirus**.

Parasites : noctuelles (chenille des organes végétatifs), l'aleurode est une mouche qui transmet des virus, acariens.

Fertilisation nécessaire : La tomate préfère les sols meubles, riches en matière organique. : Azote (N) 200, Phosphate (P) 150, Potassium (K) 300. Amendement chimique et organique possible.

Impact sur le sol en fin de culture :

Période de culture : se plante toute l'année et 2 récoltes 1.5 mois après. (Éviter les périodes trop humides)

Temps de non-retour : faire au moins une culture intercalaire, jachère, engrais vert

Remarque Agronomique : Utiliser des variétés résistantes comme Caraïbo résistante au flétrissement bactérien causé par *Rastonia soanacearum* - Heatmaster : semence résistante contre les nématodes à gale - TX 54 - TX 62.

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018i), (Quénéhervé, s. d.), (Georges Anon~ Guy Anais, Alain Chidiac 2002).

- **Melon : Cucumis melo**

Famille botanique : cucurbitacées

Maladies souvent associées : mildiou et oïdium principalement.

Parasites : La mouche mineuses, les pucerons et les thrips.

Fertilisation nécessaire : Azote (N) 200, Phosphate (P) 150, Potassium (K) 300.
Amendement chimique possible et **organique recommandé**.

Impact sur le sol en fin de culture : abime les sols, pompe de la potasse, passage nombreux de produits phyto. Attendre 1 an minimum.

Période de culture : se plante toute l'année mais préférentiellement entre janvier et juin pour l'exportation. Les fruits sont récoltés entre 60 et 80 jours plus tard.

Temps de non-retour : La production de melons épuise les sols en éléments minéraux et est très consommatrice de produits phytosanitaires. Il est donc recommandé de faire des rotations incluant d'autres cultures ou une année de jachère. Attendre au moins 1 avant de replanter.

Remarque Agronomique :

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018h).

- **Concombre : Cucumis sativus**

Famille botanique : cucurbitacées

Maladies souvent associées : corynesporiose : Petites tâches graisseuses qui évoluent en nécroses brunes. L'oïdium, mildiou et fusarium solani : pourriture au collet.

Parasites : thrips, pucerons, aleurodes, chenilles et mouches mineuses.

Fertilisation nécessaire : Azote (N) 150, Phosphate (P) 150, Potassium (K) 300.
Amendement chimique et organique possible. Ne craint pas les sols acides.

Impact sur le sol en fin de culture : moins de produit phyto car pas d'export.

Période de culture : se plante toute l'année. Les fruits sont récoltés entre 30 et 45 jours plus tard.

Temps de non-retour : 2 fois par an

Remarque Agronomique :

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018d)

• **Giraumon : Cucurbita maxima**

Famille botanique : Cucurbitacées

Maladies souvent associées : oïdium et mildiou

Parasites : pucerons, aleurode, chenilles et rongeurs

Fertilisation nécessaire : Azote (N) 150, Phosphate (P) 100, Potassium (K) 300.
Amendement chimique et organique recommandé. Ne craint pas les sols acides.

Impact sur le sol en fin de culture : apport de Mo

Période de culture : se plante toute l'année. Les fruits sont récoltés entre 90 et 120 jours plus tard.

Temps de non-retour : 2 fois par an

Remarque Agronomique :

Source :

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018e).

Annexe 9 : étude de cas de l'utilisation de la théorie de la viabilité

- **Théorie de la viabilité appliquée au cas des agrosystèmes de prairie.**

Dans l'étude de Sabatier, Oates, et Jackson publié en 2015, un modèle simple de la dynamique d'un **agroécosystème de prairie** est présenté. Le **cadre mathématique de la théorie de la viabilité** a été utilisé, afin de quantifier la résistance et la flexibilité d'un ensemble de séquences de pâturages viables. La méthode de modélisation utilisée dans le cadre de ce travail est la suivante. Dans un premier temps la dynamique de croissance de l'herbe pendant la saison de pâturage est définie. L'étude est journalière. La croissance est saisonnalisée en fonction de la période de l'année. Dans un second temps l'analyse de **la viabilité** de ce système est faite. Les deux **contraintes de viabilité** sont les suivantes :

- Le chargement⁷ ne dépasse pas la densité pouvant être alimentée par la ressource disponible.
- Le niveau de production de fourrage doit être supérieur à un seuil donné.

Une fois le **corridor de viabilité** déterminé, il est possible de faire émerger un **noyau de viabilité** contenant l'ensemble des séquences de pâturage viable. Plusieurs scénarios de séquences de pâturage ont ensuite été testés, cette opération a permis de **réduire le noyau de viabilité** qui était trop large, si toutes les trajectoires de pâturage avaient été étudiées. Les scénarios testés couvrent un vaste éventail de possibilités car ils permettent de faire varier la densité du bétail pour une date fixe, la date de début et de fin de pâturage ou bien la période de repos entre deux pâturages. Deux types de stratégies de gestion, la résistance et la flexibilité, ont également été testées. La stratégie résistante correspond à une gestion du pâturage invariante, qui ne tient pas compte des variations du milieu. A contrario pour la stratégie flexible, l'agriculteur définit une séquence de pâturage au début de l'année mais peut la modifier afin de maintenir la viabilité du système. Cette étude illustre comment les stratégies de gestion basées sur la résistance ou la flexibilité permettent de faire face à l'incertitude environnementale dans un agroécosystème de prairie (Sabatier et al 2015).

- **Théorie de la viabilité appliquée à un cas de zootechnie.**

La **théorie de la viabilité** est utilisée dans l'étude menée par Muriel TICHIT, Bernard HUBERT, Luc DOYEN et Didier GENIN, publiée en 2004. L'objectif est de modéliser mathématiquement l'effet de **pratiques de gestion de troupeaux** sur la **durabilité** des systèmes d'élevage dans un **contexte climatique incertain**. C'est une étude faite à long terme, l'échelle de temps choisie est celle de la **durée de vie d'une exploitation**. Le territoire d'étude des hauts plateaux boliviens a été choisi, il est représentatif des climats difficiles, arides. Les **contraintes de viabilité** sur lesquelles se basent l'étude des exploitations sont :

- l'efficacité correspond à l'analyse du rapport entre les coûts des moyens mobilisés, les actions menées et les résultats obtenus.
- l'efficacité correspond à une comparaison prévision/réalisation.

Les trajectoires obtenues à partir de la théorie de la viabilité, répondent aux mêmes contraintes de viabilité, c'est le **noyau de viabilité**. A partir du noyau de viabilité ainsi obtenu, des pratiques sont testées, elles permettent de restreindre le noyau de viabilité. Deux pratiques sont testées : La diversification des troupeaux de lamas et de moutons d'une part et la gestion du taux de reproduction au cours du temps en maximisant le taux de reproduction entre 2 sécheresses par exemple. Cette étude permet de monter l'effet des pratiques de gestion sur une exploitation dans des conditions de climat difficile et aride. (TICHIT Muriel et al 2004)

⁷ Chargement : il est égal au rapport entre les surfaces utilisées et l'effectif moyen d'animaux présents sur ces parcelles exprimé en UGB (Unité Gros Bovin).

- **La théorie de la viabilité utilisée pour la gestion durable de la biodiversité à travers la modélisation écologique et économique.**

Les enjeux bioéconomiques liés à la gestion des stocks dans le domaine de la pêche ou de la chasse sont cruciaux. L'étude de L. Doyen, A. Cissé, S. Gourguet, L. Mouysset, P.-Y. Hardy, C. Béné, F. Blanchard, F. Jiguet, J.-C. Perea et O. Thébaud publiée en 2013 traite de ces problématiques. Pour **une gestion durable des ressources renouvelables**, il est indispensable de modéliser l'évolution de celle-ci. Plusieurs approches sont possibles. Ces approches s'appuient sur des contraintes ou des cibles représentant le bon fonctionnement des systèmes. Ces **contraintes** sont souvent des seuils écologiques inspirés par **l'analyse de la viabilité** des populations. La prise en compte des objectifs socio-économiques (rente garantie, sécurité alimentaire, ...) permet des analyses multicritères. Ces approches aident à surmonter l'antagonisme apparent entre l'écologie, souvent préoccupée par les problèmes de survie et de conservation, et l'économie, plutôt orientée vers la recherche de l'efficacité et de l'optimisation. Un outil mathématique clé pour les problèmes de viabilité est fourni par **la théorie de la viabilité** (Aubin, 2009). Les paramètres de contrôle sont les suivants :

- le PME : rendement maximal durable, qui maximise la quantité de capture à l'équilibre.
- le MEY : rendement économique maximal, qui maximise les bénéfices à l'équilibre en intégrant les données économiques.

A partir de cela, **des contraintes** sont établies grâce à des valeurs seuils pour chacun des deux paramètres de contrôle. Ces contraintes donnent **le corridor de viabilité** auxquelles doivent répondre les trajectoires pour qu'elles soient viables. Le noyau de viabilité est alors défini, c'est l'ensemble des trajectoires qui répondent aux mêmes contraintes. La théorie mathématique de la viabilité trouve ainsi une application pour des notions d'écologie soumise aux incertitudes du milieu. (L. Doyen et al 2013).

- **La théorie de la viabilité appliquée à la biodiversité des terres agricoles et à l'agriculture.**

Dans l'étude publiée par L. MOUYSSSET, L. DOYEN et F. JIGUET en 2014, **la théorie de la viabilité** est mise en application dans le contexte agricole de **l'utilisation des terres et de gestion de la biodiversité des sols**. Le rôle des politiques publiques monétaires est examiné, vis-à-vis de l'équilibre durable entre les objectifs de conservation de la biodiversité et les exigences économiques. L'analyse des scénarios de politiques publiques agricoles **viables**, repose sur un modèle. Ce modèle s'articule, dans un contexte multi-échelle, autour de 3 composantes : la dynamique de biodiversité, les utilisations des terres agricoles et les incitations macro financières. L'approche de la viabilité a permis d'évaluer le risque bioéconomique des incitations publiques, défini par la probabilité de satisfaire un ensemble de contraintes écologiques et économiques jusqu'en 2050. La contrainte écologique est définie de telle sorte que différents indicateurs de biodiversité et de production doivent atteindre une certaine valeur. Dans l'approche de la viabilité, sont considérés les objectifs de biodiversité et de viabilité économique à travers un large ensemble de contraintes à satisfaire. Les contraintes doivent être satisfaites au sens probabiliste. Le **noyau de viabilité** ainsi obtenu permet d'identifier les différentes politiques publiques et les différents scénarios ayant un risque agroécologique acceptable.

Cette étude a permis d'éclaircir les questions et les scénarios de politiques publiques en termes d'agriculture multifonctionnelle et **d'utilisation durable des terres** et des écosystèmes agricoles. Des combinaisons de taxes et de subventions ont été étudiées pour voir dans quelle mesure elles favorisent la conciliation des objectifs écologiques et économiques sur les prairies. (L. MOUYSSSET et al 2014).

Annexe 10 : Durée du cycle de production par spéculation en fonction de la pratique adopté.

PRODUITS	Durée
canne à sucre conv.	60
canne à sucre agro	60
banane plantain agroeco.	60
banane plantain conv.	24
banane export agroeco.	60
banane export conv.	60
manioc agroeco.	12
manioc conv.	12
ignam "Jaune" agroeco.	8
ignam "Jaune" conv.	8
aubergine agroeco.	7
aubergine conv.	7
carrot agroeco	4
carrot conv.	4
ignam "Grosse Caille" agroeco.	9
ignam "Grosse Caille" conv.	8
tomate agroeco	5
tomate conv.	4
chou agoeco	3
chou conv.	3
haricot vert agroeco	4
haricot vert conv.	3
laitue agroeco	2
laitue conv.	2
concombre agroeco	2
concombre conv.	2
melon agroeco	3
melon conv.	2
giromon agroeco	3
giromon conv.	3
jachère courte	1
jachère courte améliorée	3
jachère longue améliorée	6
jachère longue	12

Annexe 11 : Méthode de calcul du BISQ dans le modèle GAIA SCOPE.

A.2 BISQ transition function

During the n th production cycle, changes in the BISQ index are given by a transition function compelling the BISQ value to evolve between 0 and 1 and defined by:

$$I(n+1) = \min(\max(I(n) - \Delta I_b(I(n), \sigma(n), \pi(n)) + \Delta I_p(I(n), \sigma(n), \pi(n))), 0), 1) \quad (\text{A1})$$



where

$$\Delta I_b(I, \sigma, \pi) = \begin{cases} \frac{R(I, \sigma, \pi)}{2R_M(\sigma, \pi)} r_d(\sigma, \pi) & \text{if } R_M(\sigma, \pi) \neq 0 \\ 0 & \text{if } R_M(\sigma, \pi) = 0 \end{cases}$$

and

$$\Delta I_p(I, \sigma, \pi) = I \cdot r_p(\sigma, \pi) + r_{ap}(\sigma, \pi),$$

where $I(n)$ is the BISQ value at the beginning of the cycle, $I(n+1)$ is the BISQ value at the end of the cycle, $\Delta I_b(I, \sigma, \pi)$ represents the change induced by the crop, and $\Delta I_p(I, \sigma, \pi)$ represents the damage or improvement caused by the agricultural practice. The parameter r_d measures the sensitivity of the soil to the loss of organic matter by crops. The parameter r_p measures the damages or improvements to the soil caused by the agricultural practice whose effects are proportional to the initial soil quality (no-tillage and green manure management under agroecological practice or chemical inputs, deep plowing under the conventional practice). The parameter r_{ap} measures other impacts on fertility that do not depend on the initial soil quality (the use of livestock manure, bean, fallow). All these parameters are characteristics of a crop–practice association and are listed in Table B2. The r_d parameter takes values in $[0, 1]$, while r_p and r_{ap} are situated between $[-1, 1]$. Changes in the BISQ index with agroecological plantain ($r_p = 0.06, r_{ap} = 0, r_d = 0.3$) and conventional yam ($r_p = -0.01, r_{ap} = 0, r_d = 0.2$) are shown in the middle panels in Figure 2 and Figure 3.

Annexe 12 : Source d'informations concernant les maladies et ravageurs de chaque spéculation du modèle

Spéculation avide	Référence bibliographique	Acteurs et experts consulté
Canne à sucre	<ul style="list-style-type: none"> - Chambre d'Agriculture Martinique. 2007. « Fiche technique : Canne A Sucre ». décembre 2007. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture-canne-a-sucre/CanneASucre.pdf. - Fabienne Rosenwald, Yann Le Chevalier. 2011. « La canne à sucre en Guadeloupe, en Martinique et à La Réunion ». <i>Agreste Primeur</i>, février 2011. - « Les plantes sucrières – La culture de la canne à sucre ». s. d. Consulté le 27 juillet 2018. http://www.lesucre.com/sucre-a-a-7/les-plantes-sucrieres/la-canne-a-sucre/culture-c4f9d3ab-b99c-4b99-96c8-be7383e8833f.html. - Lucie AURELA, Christina JACOBY-KOALY, Christophe BOC FREDON Guadeloupe. 2017a. « BSV971 CANNE-A-SUCRE BILAN 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal. 2017. http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_CANNE_Bilan2017_cle0731a9.pdf. 	<ul style="list-style-type: none"> - Robin Nazaire, technicien INRA et agriculteur cannier. - Jean Lous Diman, Ingénieur d'étude INRA. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Banane Dessert	<ul style="list-style-type: none"> - 2018b. « Fiche technique : BANANE EXPORT ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. 	<ul style="list-style-type: none"> - Jean Lous Diman, Ingénieur d'étude INRA.
Banane Plantain	<ul style="list-style-type: none"> - Chambre d'Agriculture de Martinique. s. d. « Fiche technique : Banane plantain ». Consulté le 27 juillet 2018. http://doczz.fr/doc/2391321/banane-plantain---chambre-d-agriculture-de-martinique. - Marie Bezard. 2017. « Caractérisation de la culture de bananes plantain en guadeloupe : diversité des pratiques, performance écologique et référencement technico économique ». Rapport de stage en fin d'étude. Guadeloupe: INRA Antilles Guyane - Montpellier SupAgro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Igname	<ul style="list-style-type: none"> - 2018g. « Fiche technique : Igname ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - Georges Ano, Guy Anais, Alain Chidiac. 2002. « La défense des Végétaux ». <i>Culture en régions chaudes - Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe</i>, juillet 2002. - 2017c. « BSV971 CULTURES VIVRIERES BILAN 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal. 2017. http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_VI_VRIERES_Bilan2017_cle47adf7.pdf. 	<ul style="list-style-type: none"> - José Lator, technicien INRA. - Chercheur Astro ouest INRA.
Carotte	<ul style="list-style-type: none"> - 2018c. « Fiche technique : Carrote ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - « La fonte des semis : comment lutter contre ? » s. d. Binette & Jardin. Consulté le 27 juillet 2018. https://jardinage.lemonde.fr/dossier-289-fonte-semis-maladie-dessechement.html 	<ul style="list-style-type: none"> - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher.
Haricot	<ul style="list-style-type: none"> - 2018f. « Fiche technique : Haricot vert ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - « La fonte des semis : comment lutter contre ? » s. d. Binette & Jardin. Consulté le 27 juillet 2018. https://jardinage.lemonde.fr/dossier-289-fonte-semis-maladie-dessechement.html. 	<ul style="list-style-type: none"> - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Chou	<ul style="list-style-type: none"> - Chambre d'agriculture de Martinique. 2017. « Fiche technique : Chou vert ». Site institutionnel Martinique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA. -
Laitue	<ul style="list-style-type: none"> - Chambre d'agriculture de M. 2018. « Fiche technique : Laitue ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - « La fonte des semis : comment lutter contre ? » s. d. Binette & Jardin. Consulté le 27 juillet 2018. https://jardinage.lemonde.fr/dossier-289-fonte-semis-maladie-dessechement.html. - 2017b. « BSV971 CULTURES MARAICHES BILAN 2017 ». ECOPHYTO. Bulletin de santé du végétal. 2017. http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_MARAICHES_Bilan2017_cle87fe9e.pdf. 	<ul style="list-style-type: none"> - José Lator, technicien INRA. - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.

Aubergine	<ul style="list-style-type: none"> - 2018a. « Fiche technique : Aubergine ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - Georges Ano, Guy Anais, Alain Chidiac. 2002. « La défense des Végétaux ». <i>Culture en régions chaudes - Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe</i>, juillet 2002. 	<ul style="list-style-type: none"> - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Tomate	<ul style="list-style-type: none"> - 2018i. « Fiche technique : Tomate ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - Georges Ano, Guy Anais, Alain Chidiac. 2002. « La défense des Végétaux ». <i>Culture en régions chaudes - Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe</i>, juillet 2002. 	<ul style="list-style-type: none"> - José Lator, technicien INRA. - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Melon	<ul style="list-style-type: none"> - 2018h. « Fiche technique : Melon ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. - Georges Ano, Guy Anais, Alain Chidiac. 2002. « La défense des Végétaux ». <i>Culture en régions chaudes - Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe</i>, juillet 2002. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gael, technicien INRA.
Concombre	<ul style="list-style-type: none"> - 2018d. « Fiche technique : Concombre ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. 	<ul style="list-style-type: none"> - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - José Lator, technicien INRA. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.
Giraumont	<ul style="list-style-type: none"> - 2018e. « Fiche technique : Giraumont ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/. 	<ul style="list-style-type: none"> - José Lator, technicien INRA. - David Labirin, technicien INRA et agriculteur maraicher. - Dadid Hammouya, Assistant ingénieur INRA.

Annexe 13 : Illustration des calculs pour le critère de choix relatif aux propriétés chimiques du sol, les impacts et besoins des cultures en éléments minéraux.

Le calcul de l'échelle des proportions de besoin en élément minéraux N, P et K selon la méthode précédemment défini est présenté ci-dessous :

Pour l'azote cela donne :

$$450-60=390$$

450 est la demande la plus élevée en azote, c'est celle de la banane dessert.

60 est la demande la plus faible, c'est celle du haricot vert.

390 correspond à l'amplitude entre la plus faible et la forte demande en azote sur les 13 spéculations.

$$390/3=130$$

130 est la valeur de chaque niveau. Cela signifie que l'échelle de graduation de la demande en azote est la suivante :

- **Faible demande en azote** : la demande est comprise entre 60 et $60+130=190$
- **Demande en azote moyenne** : la demande est comprise entre 190 et $190+130=320$
- **Forte demande en azote** : la demande est comprise entre 320 et $320+130=450$

Le même raisonnement est effectué pour le Phosphate et le Potassium

Pour le Phosphate :

90 correspond à l'amplitude entre la plus faible et la forte demande en azote sur les 13 spéculations.

- **Faible demande en azote** : la demande est comprise entre 60 et 90.
- **Demande en azote moyenne** : la demande est comprise entre 90 et 120.
- **Forte demande en azote** : la demande est comprise entre 120 et 150.

Pour le Potassium :

160 correspond à l'amplitude entre la plus faible et la forte demande en azote sur les 13 spéculations.

- **Faible demande en azote** : la demande est comprise entre 120 à 280.
- **Demande en azote moyenne** : la demande est comprise entre 280 à 440.
- **Forte demande en azote** : la demande est comprise entre 440 à 600.

L'échelle de proportion des besoins en éléments minéraux étant établie il est maintenant possible de classer les spéculations en fonctions de l'importance de leurs besoins en éléments minéraux. Les tableaux sont présentés dans les résultats.

Annexe 14 : Référence bibliographique relative aux besoins nutritionnels des cultures.

Spéculation	Référence bibliographique
Canne à sucre	<ul style="list-style-type: none"> « Canne à sucre - CIRAD ». s. d. Consulté le 25 septembre 2018. https://www.cirad.fr/nos-recherches/filieres-tropicales/canne-a-sucre/plante-et-usages. Chopart, J L, L Le Mézo, J L Brossier, et C L Hoareau. 2008. « Profondeur du système racinaire de la canne à sucre à la Réunion. » <i>Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement</i>, octobre, 10.
Banane Dessert	<ul style="list-style-type: none"> Lassoudière, André. 2007. <i>Le bananier et sa culture</i>. Editions Quae. « Les plantes sucrières – La culture de la canne à sucre ». s. d. Consulté le 27 juillet 2018. http://www.lesucre.com/sucre-a-a-z/les-plantes-sucrieres/la-canne-a-sucre/culture-c4f9d3ab-b99c-4b99-96c8-be7383e8833f.html. Beugnon, M, et Champion, J. 1966. <i>Etude sur les racines du bananier</i>. Institut Français de la Recherche Fruitière Outre Mer. Vol. 21. Document IFAC 7. http://agritrop.cirad.fr/457946/1/document_457946.pdf.
Banane Plantain	
Igname	<ul style="list-style-type: none"> Cornet, Denis. 2005. « ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIOLOGIQUE D'UN COUVERT VEGETAL D'IGNAME (<i>Dioscorea alata</i> L.) ». Département de biologie végétale, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. Lacointe, André, et Claude ZINSOU. 1987. « Croissance et développement au champ de l'igname (<i>Dioscorea alata</i> L.) à partir de plants produits par culture in vitro ». <i>Agronomie</i> 7 (5): 331-38.
Carotte	<ul style="list-style-type: none"> Ministère d'Agriculture et de l'Équipement rural, et Agence Canadienne de Développement International. s. d. « fiche technique carotte ». Consulté le 25 septembre 2018. Chambre d'agriculture de Martinique. 2018c. « Fiche technique : Carotte ». Site institutionnel Martinique. 12 juillet 2018. https://martinique.chambre-agriculture.fr/.
Haricots Vert	
Choux Vert	
Laitue	<ul style="list-style-type: none"> PERIARD-LARRIVEE YANN. 2012. « IRRIGATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA LAITUE ROMAINE EN SOL ORGANIQUE ». Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval.
Tomate	
Aubergine	
Melon	
Concombre	

Annexe 15 : Recherche bibliographique relative aux impacts des architectures racinaires sur la compacité du sol.

Les racines peuvent avoir un effet agrégeant par compression lors de la croissance de celles-ci et par dessiccation locale au niveau des poils racinaires. De ce fait les racines stabilisent la structure des capillaires qu'elles tracent dans le sol par leurs propres exsudats et par les gommes des populations microbiennes qui se développent autour d'elles. (Massenet Jean Yves 2012)

Lors de leur croissance, les racines créent une zone de **modification de la structure du sol** autour d'elles. Les particules du sol sont déplacées et forment une zone où la densité massique du sol est plus élevée (Aravena et al. 2011) (Heymans 2018).

A long terme, les racines sont des micro-ingénieurs du sol et **changent la porosité** à travers la formation des agrégats. Cependant, les principaux facteurs de modification de la structure seront les micro-organismes nourris à travers les exsudats racinaires. (Feeney D. S., Crawford J. W., Daniell T., Hallett P. D., Nunan N., Ritz K., Rivers M., and Young I. M. 2006) La teneur en micro-organismes dans le sol, est à la base du calcul du BISQ, leurs impact sur le sol est donc déjà pris en compte dans le modèle. Nous nous concentrerons donc sur **l'effet des racines**.

Les racines tracent des chemins permettant de créer des bio-pores et peuvent jouer un rôle de **labour biologique** en atténuant la compaction (Williams S. M., and Weil R. R. 2004).

En plus de rendre le sol plus poreux, **les racines créent des passages pour les racines de la culture suivante**. Celles-ci passeront préférentiellement à travers les chemins pré-effectués par la culture précédente pour pousser. La quantité de racines présentes l'année suivante sera alors plus importante (Han E., Kautz T., Perkons U., Uteau D., Peth S., Huang N., Horn R., and Köpke U. 2015). Il est donc judicieux de planter un couvert dont les racines auront plus ou moins **la même profondeur** d'enracinement que celles de la culture suivante. (Heymans 2018)

Plusieurs études montrent l'effet des cultures et de leurs racines sur les propriétés physiques du sol.

(Caneill et al. 2014) et (Durand Maxime 2013) montrent dans leurs études que l'utilisation de *Stylosanthes guianensis* comme plante de service dans les plantations d'ananas permet de **décompacter les sols**. La prospection racinaire de cette plante augmente la porosité du sol et de ce fait le décompacte. Cette plante de service est présentée comme **une alternative au travail du sol** par le labour par exemple car elle permet de décompacter tout en conservant la structure du sol.

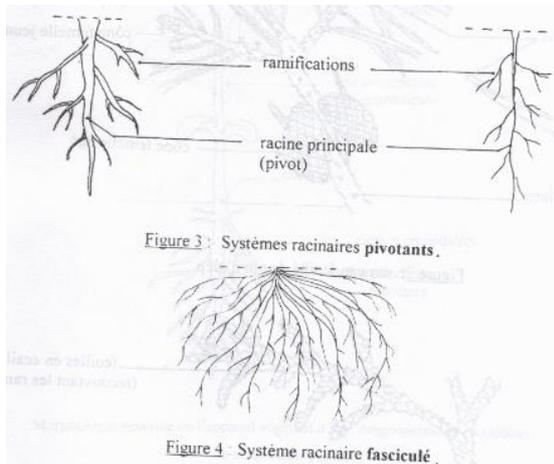
(Siegenthaler Georges s. d.) a étudié le développement racinaire de la vigne principalement. Les plantes annuelles ont généralement un enracinement pouvant descendre jusqu'à 2m alors que les pérennes vont jusqu'à 5m de profondeur. Cela dépend bien sûr de l'épaisse et des conditions du milieu. Il rappelle également l'importance des racines dans l'apport de MO, en effet sur une prairie, 50 à 60% de la MO proviennent du système racinaire. **Les racines jouent un rôle important dans la structure du sol**, elles en influencent fortement la structure.

(Caneill et al. 2014) propose des alternatives au travail du sol en utilisant des cultures permettant de décompacter le sol. Les racines agissent à trois niveaux pour favoriser la décompaction du sol :

- la croissance axiale de la racine qui, grâce à sa force de pénétration, crée ou pénètre des porosités de taille inférieure.
- la force de croissance radiale qui permet d'accroître le diamètre des pores. Par la suite, les trajets racinaires résultant de la colonisation du sol par les racines créent, une fois ces dernières mortes, un réseau poral susceptible de **favoriser l'enracinement de l'espèce suivante**, les transferts sol-plantes, l'évacuation de l'eau en excès et l'activité biologique (Ehlers, Köpke et al. 1983; Dexter 1991; Silva and Rosolem 2001) par (Caneill et al. 2014)

- l'alternance de phases de dessiccation, pouvant être accentuée par la racine, et d'humectation, en relation avec l'environnement, impacte aussi la structure du sol. (Caneill et al. 2014)

Certaines espèces montrent des aptitudes plus favorables que d'autres à la décompaction des sols. Elles possèdent des traits racinaires capables de modifier plus ou moins fortement la structure du sol. Les espèces peuvent être ségréguées sur la base de caractères physiologiques directement liés à leur capacité de décompaction du sol. (Caneill et al. 2014)



Architecture racinaire, source : (Benadjaoud A. 2015)

Annexe 16 : Les étapes de travail permettant de calculer le nombre MR par couple de spéculations.

L'inventaire des maladies et ravageurs touchant chaque spéculation est effectué dans les tableaux suivant. Le niveau d'affectation de la spéculation par la maladie est marqué grâce à des couleurs différentes.

Inventaire des maladies fongiques et de leur niveau d'affectation sur les 13 spéculations du modelé GAIA SCOPE, d'après la littérature.

	Maladie Fongique													
	Mildiou	Charbon	Rouille	Cercosporio	Cercosporio	certosporio	Anthraco	Phyllosticta	Alternariose	Sclerotium r	Septoriose	oïdium	fonte de ser	Phytophtho
canne														
banane P														
Banane D														
Igname														
Carotte														
Haricot V														
Lautue														
Choux V														
Aubergine														
Tomate														
Melon														
Concombre														
Giromaun														

Légende :

	pas touché
	faiblement touché
	touché

Pour ce qui est de la canne, les maladies fongiques ont un impact très faible sur la productivité des exploitations cannières Guadeloupéenne car les conduites de cultures associées à un effort sur la sélection variétale ont quasiment éradiqué la présence de ces champignons. L'utilisation de variétés résistantes a joué un rôle important dans la diminution de la pression due aux maladies en général. Les principaux moyens de luttés qui ont été déployés sont la résistance variétale avec des variétés provenant de la Barbade, de la Réunion et de Coimbatore en Inde. La veille sanitaire est le second moyen de lutte contre les maladies. Avant que les variétés ne soient disponibles en Guadeloupe, une quarantaine de 2 ans est assurée par le CIRAD de Montpellier et de Guadeloupe. (C.Dinis et N.Wagner 2005)

La tomate est touchée par la maladie de la nécrose apicale due à une carence en calcium, elle n'est donc pas prise en compte dans ce tableau car cette maladie ne se transmet pas de spéculation en spéculation. Seules les maladies pouvant être transmises sont prises en compte dans le cadre de ce raisonnement sur les successions culturales.

On remarque que les cucurbitacées partagent les mêmes maladies fongiques, d'où l'importance de ne pas les mettre à la suite dans des successions culturales. On évite ainsi le développement d'un foyer infectieux.

L'oïdium touche 6 spéculations mais chaque spéculation est touchée par un champignon différent qui n'est pas supposé se transmettre d'une spéculation à une autre, mises à part les spéculations de même famille botanique, proches génétiquement.

Plusieurs maladies sont partagées par la carotte et le haricot vert, il n'est donc pas recommandé de faire se succéder ces deux spéculations. On retrouve également des similitudes entre même famille botanique, cucurbitacée principalement.

Elles partagent le mildiou et l'oïdium. Les musacées partagent la cercosporiose noire. En revanche on ne retrouve pas les mêmes maladies fongiques pour les solanacées.

Tableau : Inventaire des maladies bactériennes et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	Maladie bactérienne				
	Gomose	Echaudure	rabougrisser	Flétrissement	Erwinia
canne					
banane P					
Banane D					
Igname					
Carotte					
Haricot V					
Lautue					
Choux V					
Aubergine					
Tomate					
Melon					
Concombre					
Giraumon					

Légende :

	pas touché
	faiblement touché
	touché

Comme évoqué précédemment les maladies bactériennes qui touchent la canne à sucre ont pu être éradiquées grâce à un effort de la recherche sur la sélection variétale. (C.Dinis et N.Wagner 2005) C'est pour cette raison que la spéculation canne à sucre est considérée comme faiblement touchée, la maladie existe toujours sur le territoire guadeloupéen mais n'affecte pas la production. Source : A dire d'expert Robin Nazaire.

Le flétrissement bactérien doit être surveillé car cette maladie est commune à trois spéculations : la canne à sucre, la tomate et l'aubergine. Nous notons que tomate et aubergine partagent un certain nombre de maladies. Ce sont donc des spéculations qu'il faut éviter de faire se succéder dans les trajectoires d'exploitation.

Tableau : Inventaire des maladies virales et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	Maladie Virale							
	mosaïque	maladaie de	strie chlorot	virose Banar	virose de l'ig	virus bronzé	mosaïque du	mosaïque de
canne								
banane P								
Banane D								
Igname								
Carotte								
Haricot V								
Lautue								
Choux V								
Aubergine								
Tomate								
Melon								
Concombre								
Giraumon								

Légende :

	pas touché
	faiblement touché
	touché

Les maladies virales présentées dans le tableau 3 ci-dessus ne sont pas communes à plusieurs spéculations mis à part la mosaïque des cucurbitacées qui touche le melon, le concombre et le giraumon. La seule vigilance pour les successions culturales dans le cas des maladies virale se porte donc sur les cucurbitacées. (Fiches technique par cultures, Chambre d'agriculture de Martinique)

Tableau : Inventaire des ravageurs et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	Ravageurs																				
	vers blanc	puceron	cochenille	borers	Charançon	Nematode	Nematode g	Nematode g	Trips	Araignée Ro	coléoptère	criquet	fourmi	cidelle	chenille	mouche mir	Aleurodes	Acariens	Noctuelle	Rongeur	
canne																					
banane P																					
Banane D																					
Igname																					
Carotte																					
Haricot V																					
Lautue																					
Choux V																					
Aubergine																					
Tomate																					
Melon																					
Concombre																					
Giraumon																					

Légende :

	pas touché
	faiblement touché
	touché

Ce dernier tableau est déterminant dans la prise en compte des MR car un grand nombre de ravageurs touchent les 13 spéculations étudiées par le modèle. Au total 20 ravageur sont étudié ici.

Pour pouvoir avoir une vision plus claire et succincte des maladies communes à plusieurs spéculations il est indispensable de comptabiliser le nombre de Maladies et Ravageurs (MR) pour chaque spéculations.

La technique de comptage est la suivante :

Pour une spéculations donnée, nous comptabilisons le nombre de maladies que cette spéculations partage avec les 12 autres spéculations du modèle.

Les valeurs indiquées dans les cases ne correspondent pas aux nombres de maladies qui affecte la spéculation, mais bien le nombre de maladies communes à la ligne et à la colonne correspondant à la case de croisement.

Dans le tableau la diagonale correspondant aux maladies que deux spéculations identiques ont en commun, est surlignée en noir.

Les maladies communes aux spéculations sont comptabilisées pour chaque type de maladie puis pour les ravageurs. La dernière étape consiste à sommer ces tableaux, dans le but d'obtenir le nombre total de MR partagés par deux spéculations. Ce tableau final correspond au tableau 3 ci-dessous. Une fois que le nombre de MR partagés par les spéculations est obtenu il est visuellement plus évident d'identifier les spéculations à ne pas mettre en précédant dans les successions culturales du modèle du point de vue des MR partagés. Plus le nombre de MR partagés entre deux spéculations est élevé, plus le risque de transmission de cette spéculation à la suivante est élevé. La transmission des maladies d'un cycle de production au suivant favorise la création d'un foyer de pathogènes, ce phénomène doit être évité.

Tableau : Inventaire des maladies fongique et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	canne	banane P	Banane D	igname	Carotte	Haricot V	Lautue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
canne								1			1	1	1
banane P			1										
Banane D		1											
igname									1				
Carotte					4	2	1				1	1	1
Haricot V					4	1	1				1	1	1
Lautue					2	1							
Choux V	1				1	1					2	2	2
Aubergine				1									
Tomate													
Melon	1				1	1		2				2	2
Concombre	1				1	1		2			2		2
Giraumon	1				1	1		2			2	2	

Le code couleur permet d'identifier rapidement les spéculations partageant des maladies. Dans le cas des maladies fongiques on remarque que le haricot et la carotte ont 4 maladies fongiques en commun. L'échelle allant de 0 à 5 maladies partagées, 4 est un chiffre relativement élevé.

Les spéculations qui partagent 2 maladies sont : la laitue et la carotte, le chou partagent 2 maladies en commun avec les cucurbitacées (melon, concombre et giraumont). Au même titre que les cucurbitacées entre elles.

Légende :

0
1
2
3
4
5

Tableau : Inventaire des maladies bactériennes et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Lautue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
canne	■								1	1			
banane P		■											
Banane D			■										
Igname				■									
Carotte					■								
Haricot V						■							
Lautue							■						
Choux V								■					
Aubergine									■	1			
Tomate										■			
Melon											■		
Concombre												■	
Giraumon													■

Légende :

0
1
2
3
4
5

Le nombre de maladies fongiques partagé par deux spéculations est faible, maximum 1. Les couples de spéculation concernée sont : Aubergine/tomate, Canne/tomate et Canne/aubergine.

Tableau : Inventaire des maladies virales et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Lautue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
canne	■												
banane P		■											
Banane D			■										
Igname				■									
Carotte					■								
Haricot V						■							
Lautue							■						
Choux V								■					
Aubergine									■				
Tomate										■			
Melon											■		1
Concombre											1	■	1
Giraumon											1	1	■

Légende :

0
1
2
3
4
5

Les maladies virales communes à deux spéculations concernent seulement la famille des cucurbitacées : Melon/Concombre, Melon/Giraumon et Concombre/Giraumon.

Tableau : Inventaire des ravageurs et de leur niveau d'affection sur les 13 spéculations du modèle GAIA SCOPE.

	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Lautue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
canne				1		2		2		1	1		3
banane P			3	1		1			1	1	1		
Banane D		3		1		1			1	1	1		
Igname	1	1	1		1								
Carotte				1									
Haricot V	2	1	1					2	1	2	2		2
Lautue										1	1		
Choux V	2					2			1	3	1		3
Aubergine		1	1			1		1		3	1		1
Tomate	1	1	1			2	1	3	3		2		2
Melon	1	1	1			2	1	1	1	2			1
Concombre													
Giraumon	3					2		3	1	2	1		

(Chambre d'agriculture de Martinique 2018a), (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017d), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018b), (Chambre d'Agriculture de Martinique s. d.), (M.Tindo, A. Tagne, J. M. Mpe, M. Ayodele et A. Ndikontar, s. d.), (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017a) , (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017c), (Chambre d'Agriculture Martinique 2007), (Fabienne Rosenwald, Yann Le Chevalier 2011), (Stehlé 1956), (« Les plantes sucrières – La culture de la canne à sucre » s. d.), (C.Dinis et N.Wagner 2005), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018c), (Chambre d'agriculture de Martinique 2017), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018d), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018e), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018f) , (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017c), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018g), (Lucie AURELA,Christina JACOBY-KOALY,Christophe BOC FREDON Guadeloupe 2017b), (Chambre d'agriculture de M 2018), (« La fonte des semis : comment lutter contre ? » s. d.) , (Chambre d'agriculture de Martinique 2018h), (Chambre d'agriculture de Martinique 2018i), (Marie Bezard 2017), (Georges Ano~ Guy Anais, Alain Chidiac 2002).

Légende :

0
1
2
3
4
5

A partir du tableau faisant l'inventaire des ravageurs touchant les spéculations du modèle, nous avons remarqué le grand nombre de ravageurs affectant les cultures. Il est donc normal que le nombre de ravageurs commun à deux spéculations soit important.

Certaines spéculations sont plus touchées que d'autres. Nous notons que les couples suivants, ont 3 ravageurs en commun : Banane plantain/ Banane Dessert, Canne/Giraumon, Tomate/Chou, Tomate/Aubergine et Giraumon/Chou.

Les coupes de spéculation ayant 2 ravageurs en commun sont les suivants : Canne/Haricot, Canne/Chou, Haricot/Chou, Haricot/Tomate, Haricot/Melon, Haricot/Giraumon, Tomate/Melon et Tomate/Giraumon

Annexe 17: Les étapes de travail permettant de calculer les besoins en éléments minéraux de chaque spéculation.

Ce premier tableau permet de mettre en évidence les besoins de chaque spéculation en début de culture et donc de voir quelle culture est placée avant ou après tel autre. Plusieurs primaires ont été pris en compte dans les besoins des plantes vis à vis du sol :

- Les besoins en éléments chimiques nutritifs : Azote(N) Phosphore (P), Potassium (K), Magnésium (Mg), Matière Organique (MO).
- Le pH : plutôt acide ou basique (alcalin).
- Les caractéristiques physiques : ici nous nous intéressons à l'état de compaction du sol.

Tableau : Besoin de chaque spéculation, en début de culture et impact de la spéculation sur la compaction du sol en fin de cycle (en unité par kilogramme).

Variables	N	P	K
Canne	120	80	160
Banane Dessert	450	150	125
Banane Plantin	300	150	600
Igname	125	90	175
Carotte	100	80	200
Haricot V	60	90	120
Laitue	120	60	120
Choux V	150	100	150
Aubergine	300	150	400
Tomate	200	150	300
Melon	200	150	300
Concombre	150	150	300
Giraumon	150	100	300

Les besoins en éléments minéraux en début de culture sont exprimés en unité par kilogramme.

Ce tableau présente l'évaluation des besoins de chaque spéculation en fonction de l'échelle à trois niveaux. L'échelle est spécifique à chaque élément minéral.

Tableau : Hiérarchisation des besoins en éléments minéraux des spéculations.

Variables	N	P	K
Canne	120	80	160
Banane Plantin	300	150	600
Banane Dessert	450	150	125
Igname	125	90	175
Carotte	100	80	200
Haricot V	60	90	120
Laitue	120	60	120
Choux V	150	100	150
Aubergine	300	150	400

Tomate	200	150	300
Melon	200	150	300
Concombre	150	150	300
Giraumon	150	100	300

A partir de ce tableau nous allons évaluer les couples de spéculations deux à deux en fonction de leurs besoins en éléments minéraux. Les trois tableaux suivants sont spécifiques à un élément minéral N, P et K. Les spéculations en colonne correspondent aux cultures précédentes et les spéculations en ligne correspondent aux cultures suivantes. Les chiffres se rapportent à l'échelle d'évaluation de la légende.

Tableau : Compatibilité de couples de spéculation en fonction de leurs besoins en Azote.

Azote (N)													
Speculation	canne	banane P	Banane D	igname	Carotte	Haricot V	Laitue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
Canne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Banane Plantin	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Banane Dessert	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Igname	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Haricot V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Laitue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Choux V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aubergine	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Tomate	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Melon	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Concombre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giraumon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau : Compatibilité de couples de spéculation en fonction de leurs besoins en Phosphate.

Phosphate (P)													
Speculation	canne	banane P	Banane D	igname	Carotte	Haricot V	Laitue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
Canne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Banane Plantin	0	0	2	0	0	0	0	1	2	2	2	2	1
Banane Dessert	0	2	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	1
Igname	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Haricot V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Laitue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Choux V	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Aubergine	0	2	2	0	0	0	0	1	0	2	2	2	1
Tomate	0	2	2	0	0	0	0	1	2	0	2	2	1
Melon	0	2	2	0	0	0	0	1	2	2	0	2	1
Concombre	0	2	2	0	0	0	0	1	2	2	2	0	1
Giraumon	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0

Tableau : Compatibilité de couples de spéculation en fonction de leurs besoins en Potassium.

Potassium (K)													
Speculation	canne	banane P	Banane D	Igname	Carotte	Haricot V	Laitue	Choux V	Aubergine	Tomate	Melon	Concombre	Giraumon
Canne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Banane Plantin	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Banane Dessert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Igname	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Haricot V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Laitue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Choux V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aubergine	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Tomate	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
Melon	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Concombre	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
Giraumon	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0

La somme des trois tableaux correspondant aux besoins en Azote, Phosphate et Potassium est effectuée dans le tableau 4.

Annexe 18 : Les étapes de travail permettant de calculer les besoins en matière organique de chaque spéculat.

Nous faisons l'inventaire des résidus de cultures par spéculat et de la matière organique que ceux-ci apportent à la parcelle à la fin de chaque cycle de production. Les résultats sont présentés dans ce tableau.

Tableau : Résidu de culture et matière organique en fonction du type de culture.

Spéculat	Résidus	Rendement tonne /ha	Coefficient iso humique K1 (% mat sèche)	Restitutions humiques (kg d'humus /ha/an)	Teneur en N (kg/t)
Canne à sucre	Paille, de bouts blancs, de morceaux et de tiges entières de canne	14.6 (Matière sèche)	NA	NA	NA
Banane dessert	Feuilles et troncs	NA	NA	NA	NA
Banane plantain		NA	NA	NA	NA
Igname		NA	NA	NA	
Carotte	Fanes	14.5	NA	NA	2.3
Haricot		NA	NA	NA	NA
Laitue	0	0	0	0	NA
Choux	0	0	0	0	NA
Tomate	Résidus aériens	65	NA	NA	3
Aubergine	Résidus de cultures	48	NA	NA	3
Melon	Parties aériennes	3.3 (Matière sèche) ou 14 (mf)	13.5%	445	3.6
Concombre	NA	NA	NA	NA	NA
Giraumon	NA	NA	NA	NA	NA

NA : pas d'information chiffrée.

Source :

Melon : (ITAB, 2001 ; CEHM* 2011) * communication personnelle. CA11 : Chambre d'Agriculture de l'Aude, CA66 : Chambre d'Agriculture du Roussillon, CEHM : Centre d'Expérimentation Horticole de Marsillargues. (ROUDAUT, GASPARD, et BOYER 2011)

Maraichage : les résidus de cultures apportent peu de MO. (Vedie 2011). Les Teneur en matière sèche sont issus du document suivant : (Comifer groupe azote-soufre 2013)

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

Mt : N minéralisé provenant des résidus de culture au temps t Une fraction résiduelle K1 (coefficient iso-humique) des résidus de culture reste sous forme organique et est transférée au stock d'azote organique du sol (SONt). L'autre fraction est directement minéralisée. Selon Thiuleux (2006), le taux de minéralisation (Mi) de cette fraction varie avec le temps selon une fonction exponentielle décroissante : $M_i = \exp(K_{deg1} + K_{deg2} \cdot i)$

Où i est le nombre de semaines après la restitution des résidus et Kdeg1 et Kdeg2 sont deux paramètres caractérisant la dynamique de la minéralisation de l'azote organique, respectivement égal à 3.2 et -0.19 pour les résidus de bananier. (Laurens 2008)

Canne : quantité de résidus de récolte en kg/ha pour une parcelle récoltée sans technique de brûlage : moyenne entre deux parcelles : $(15.42+13.78)/2= 14.6\text{kg/ha}$. (Tolale, et al 2008)

La quantité de matière sèche varie de 7 à 18 tonnes/ha pour un rendement commercial de 100 tonnes de canne/ha. (Chabalière, Kerchove, et Saint Macary 2006)

Les déchets verts et compost : ils ont une teneur en azote total (kgN /t de produit brut) = 10. (Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée 2013).

	ELEVEE (tête de rotation)	MOYENNE (2 ^{ème} ou 3 ^{ème} place)	FAIBLE (2 ^{ème} ou 3 ^{ème} place)
MO peu évoluée	Aubergines, tomates, céleris, pommes de terre, courgettes, artichaut	Melons, poivrons, navets	Radis
MO évoluée	Poireaux, fenouil, choux, épinards, betterave	Salades, carottes	Oignon, échalotte, ail, légumineuses, haricots

Les besoins des cultures maraichère en matière organique, Source : (Vedie 2011)

Annexe 19 : Les étapes de travail permettant de déterminé l'impact des racines sur les propriété physique du sol pour chaque spéculation.

Tableau : Architecture, profondeur d'enracinement et effet de décompactation des sols des racines en fonction des spécificités de chaque spéculation.

Spéculation	Pivotante	Fasciculé	Traçante	Profondeur d'enracinement	Effet décompactant du sol
Canne à sucre		X		0 à 100cm / max : 400cm	Très Bon
Banane dessert		X		0 à 60 cm / Max :400cm	Bon
Banane plantain		X		0 à 60 cm / Max :400cm	Bon
Igname	X tubérisé			Max : 30cm	Très superficiel
Carotte	X tubérisé			0 à 30cm / Max : 60cm	Faible
Haricot	X			0 à 30cm / Max : 60cm	Relativement bon
Laitue	X	X		0 à 25cm / max 100cm	Faible
Choux	X			0 à 30cm / Max : 60cm	Relativement bon
Tomate	X			0 à 30cm / Max : 60cm	Faible
Aubergine	X				Faible
Melon			X	30-40cm / max : 100cm	Faible
Concombre			X	30-40cm / max : 100cm	Faible
Giraumon			X	30-40cm / max : 100cm	Faible

Les ressources bibliographiques pour la réalisation de ce tableau sont les suivantes :

Canne à sucre : Les racines sont denses et profondes. C'est pourquoi la canne à sucre protège bien les sols. (« Canne à sucre - CIRAD »)

Les racines peuvent atteindre entre 2m, 4m ou 6 m selon la littérature, les résultats les plus récents évoquent 4m. La densité racinaire est importante dans les premiers 80-100cm. (Chopart et al. 2008)

Le système racinaire de la canne a sure est vigoureux, la prospection racinaire est efficace, par sa morphologie, le système racinaire améliore la qualité et la structure des sols. Elle lutte également contre l'érosion des sols. (AHOHOUNDO Alexis 2009)

Banane : les racines peuvent aller jusqu' à 3 ou 4 m de profondeur. Deux types de racines existent :

- Racine courte non ramifiée : 0-20cm
- Racine utile ramifiée entre 20-50cm/ 50-100cm/+100cm. (Beugnon. M, et Champion. J 1966)

L'architecture racinaire est fasciculée, les racines ont un rythme de croissance et d'émission différent selon le stade de croissance de la plante. Elles sont très dépendantes de l'état hydrique du sol. La

densité racinaire est élevée entre 0 et 30cm sur 60cm de rayon autour du bulbe. L'enracinement est satisfaisant jusqu'à 60cm de profondeur et 120cm de rayon. Des racines peuvent descendre jusqu'à 3m mais sont peu nombreuses. (Lassoudière 2007)

Banane Plantain : racines supposées identiques car issues de la même famille botanique. Caractéristique morphologique proche.

Igname : « Outre les racines, la partie souterraine est constituée essentiellement de pré tubercules attenants les uns aux autres. Ce sont des structures globuleuses de quelques millimètres, portant la quasi-totalité des racines disposées en couronne. Tout rameau porte un pré tubercule à sa base si celle-ci est enterrée. La succession des « générations » de tiges apparaît liée à une filiation de leurs pré tubercules basaux.» (Lacointe et ZINSOU 1987)

Une grande diversité de variété d'ignames comestibles existe mais globalement leur système racinaire est similaire. C'est une racine tubérisée avec des racines adventives qui ont une prospection racinaire très superficielle, la profondeur d'enracinement ne dépasse pas 30cm. (Cornet 2005)

Carotte : C'est une racine pivotante tubérisée pouvant atteindre 30cm de profondeur de sol d'après les recommandations de travail du sol de fiche technique. La prospection racinaire est très superficielle. (Ministère d'Agriculture et de l'Équipement rural et Agence Canadienne de Développement International) (Chambre d'agriculture de Martinique 2018c).

Laitue : Le système racinaire est pivotant (25 –30 cm) épais et chevelu. Selon la technique de semi utilisé il peut prendre un aspect plus fasciculé. La profondeur d'enracinement varie en fonction de l'état hydrique du sol. Forte densité de racine entre 0 et 15 cm et prospecte jusqu'à 10 à 25cm. En condition de stress hydrique les racines peuvent descendre jusqu'à 100cm. (PERIARD-LARRIVÉE YANN 2012). Ce sont des racines fines, qui ont donc un faible effet décompactant sur le sol.

Superficielles (jusqu'à 30 cm de profondeur)	Intermédiaires (entre 30 et 60 cm de profondeur)	Profondes (supérieures à 60 cm de profondeur)
céleri laitue oignon pomme de terre radis	brocoli carotte chou chou-fleur concombre courgette haricot mange-tout melon brodé poivron tomate	asperge citrouille courge d'hiver maïs sucré melon d'eau panais

tableau de la profondeur d'enracines des cultures potagères par (Verhallen et Roddy 2009)

Melon : racine traçante qui reste en surface. Les racines traçantes se développent horizontalement sous la surface du sol. Odet, J. (1991). Chapitre 3 - La plante. In Le melon (pp. 59–65), Ctifl Editions.

Concombre : même famille botanique que le melon, les caractéristiques morphologiques des racines sont supposées être proches.

Giraumon : même famille botanique que le melon, les caractéristiques morphologiques des racines sont supposées être proches.

La structure du sol peut être améliorée en surface et en profondeur grâce au semis d'engrais vert. Certaines familles botaniques ont un effet sur le sol plus intéressant grâce à l'action mécanique de fissuration par les racines directement liées à leur architecture racinaire. Les espèces les plus intéressantes sont les **crucifères** qui comportent des racines pivotantes puissantes. Le **chou vert** fait partie de la famille des crucifères. D'autre part, les **Poacées** (graminées) dont fait **partie la canne à sucre**, présentent un système racinaire fin et dense. Les **légumineuses** comme **le haricot**, présentent également un système racinaire assez dense. (GRAB, Institut Technique de l'Agriculture Biologique, et IBB InterBio Bretagne 2005)

Nous avons présenté les effets des cultures en fin de cycle de production sur l'état de compaction du sol. Nous allons maintenant nous intéresser **aux besoins des cultures pour leur mise en place** sur la parcelle.

Les besoins en termes de qualité de sol pour chaque culture :

Canne à sucre :

Sous-solage croisé (30 à 50 cm de profondeur) Pseudo-labour croisé, préférable au labour pour éviter le retournement brutal du sol. Hersage : affinage du sol, profondeur de travail 5 à 15 cm Sillonnage recommandé : Travail du sol à la roto bêche puis sillonnage, ou travail minimum du sol (selon les conditions de terrain).

Banane Dessert : Sols profonds drainant bien.

1 mois avant plantation : Giro broyage, sous-solage croisé ou labour profond, pulvérisateur à disques, sillonnage (1,80 m) - Trous de 0,5 x 0,5 x 0,5 m

Banane Plantain : La banane plantain préfère des sols profonds se drainant bien

1 mois avant plantation : Giro broyage, sous-solage croisé ou labour profond, pulvérisateur à disques, sillonnage à 1,80 m ou 2,50 m - Trous de 0,5 x 0,5 x 0,5 m

Igname : Terres fertiles, meubles et bien drainées

Sous-solage Labour profond Fraisage Billonnage (Billons espacés de 1,20 m à 1,60 m)

Carotte : les sols bien drainés et profonds à texture légère

Hersage - Fraisage en fonction du type de sol. Plus recommandé : Préparation du sol à la roto bêche. Confection de planches de 1,20 m de large

Haricot vert :

Hersage - Fraisage en fonction du type de sol. Plus recommandé : Travail du sol à la roto bêche. Confection de planches de 1,20 m de large

Laitue : Sols bien ameublés et bien pourvus en calcium et en matière organique

Hersage - Fraisage en fonction du type de sol Confection de planches (1,20 m de large)

Chou vert :

Hersage - Fraisage - Billonnage en fonction du type de sol Plus recommandé : Préparation du sol à la roto bêche. Aplatis la crête des billons - Réaliser 2 lignes de culture par billon

Tomate : La tomate préfère les sols meubles, riches en matière organique, aérés, bien drainés

Hersage - Fraisage – Billonnage, selon le type de sol Plus recommandé : préparation du sol à la roto bêche puis Billonnage (Billons espacés de 1,40 à 1,60 m)

Aubergine : Espèce aux exigences de sol voisines de celles de la tomate (sols profonds et bien préparés)

Hersage – Fraisage - Billonnage selon le type de sol Plus recommandé : Travail du sol à la roto bêche puis Billonnage Billons espacés de 1,40 m à 1,60 m

Melon : sols à soubassement calcaire

Hersage - Fraisage - Billonnage en fonction du type de sol Plus recommandé : Travail du sol à la roto bêche, puis Billonnage Paillage plastique du sol possible

Concombre :

Hersage - Fraisage ; en fonction du type de sol Plus recommandé : Travail du sol à la roto bêche

Giraumon :

Hersage - Fraisage en fonction du type de sol Plus recommandé : Travail du sol à la roto bêche

Ces informations peuvent être résumées de la façon suivante :

- Les culture maraichères et vivrières ont besoin d'un sol meuble et bien décompacté sur une faible profondeur. Les travaux du sol recommandé restent sur une faible profondeur.
- La Canne à sucre, la Banane dessert et plantain ont besoin de sol décompacté en profondeur.

Annexe 20 : Représentation graphique des 6 type d'exploitation agricole dont les trajectoires ont été modélisé dans la publication Durant et all.

Pour les figures 6 à 9, sont modélisées des exploitations agricoles avec les cultures d'exportation : canne et banane sur une période de 480 mois, soit 40ans. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798^8$. La figure 7 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique qu'elle doit être viable.

La figure 8 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique d'avoir une trajectoire viable avec changement de culture imposé chaque fois que cela est possible.

La figure 9 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique d'avoir une trajectoire viable, tout en minimisant w à chaque nouvelle récolte.

Les figures 10 à 12 présentent les sorties du modèle pour des exploitations agricoles destinées au marché local avec des productions végétales de diversification. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$ et des charges fixes $Cf = 100$.

La figure 10 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique, les condition initiales suivante $\tau = 0$, $w_0 = (0.4, 0) = 3112$, , sur une durée de 480 mois soit 40 ans.

La figure 11 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique, les conditions initiales suivante $\tau = 240$, $w_0 = (0.4, 240) = 3112$, sur une durée de 240 mois soit 20 ans.

La figure 12 représente une trajectoire d'exploitation qui a pour contrainte spécifique, les conditions initiales suivantes $\tau = 378$, $w_0 = (0.4, 378) = 21932$, sur une durée de 102 mois soit 8.5 ans.

Nous nous concentrerons sur le graphique représentant les successions culturales des trajectoires d'exploitation sur 40 ans. (Graphique en haut à droite des figures 7 à 12). Les étapes du travail de validation peuvent s'articuler autour de trois étapes.

- **Etat initial :**

⁸ • I est une variable discrète représentant un indicateur de qualité de sol mesuré au début du cycle de production.

- τ , est une variable discrète qui fournit la date du début du cycle de production en cours.
- w : est une variable continue décrivant le revenu cumulé acquis au début du cycle de production.

La figure 7 modélise des exploitations agricoles avec les cultures d'exportation : canne et banane sur

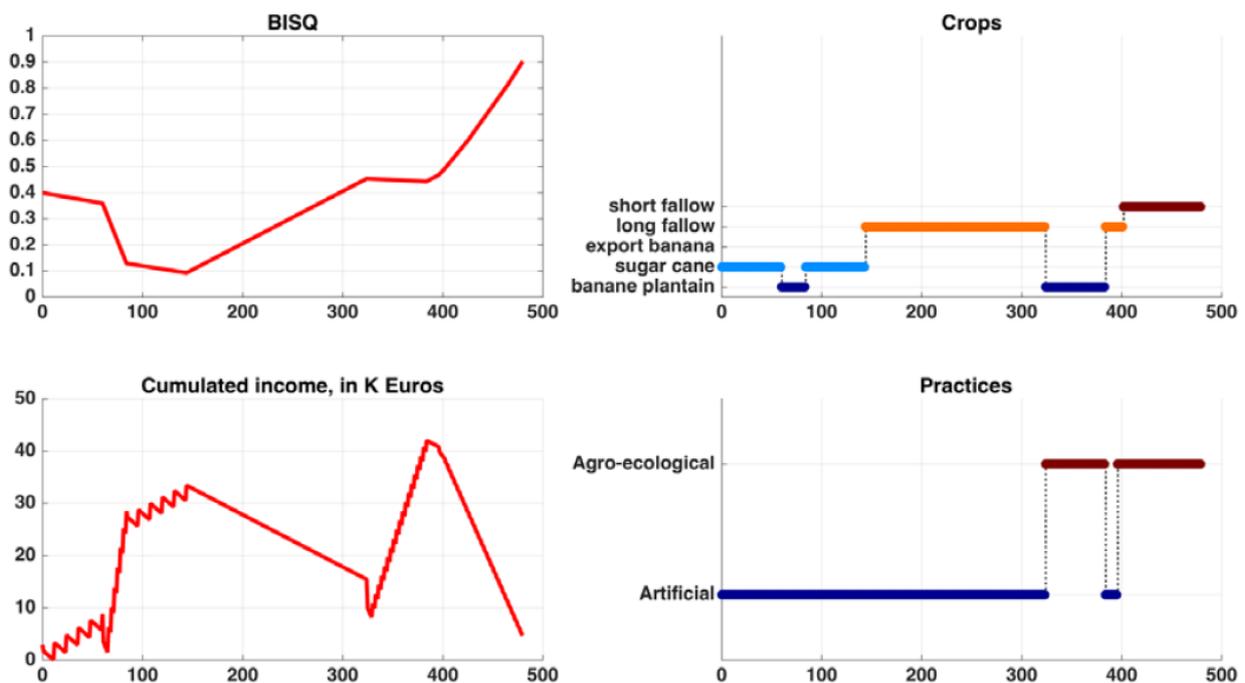


FIGURE 7 Farm management trajectory starting with an initial capital equal to the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798$. Export market farming (banana-sugar cane), viable trajectory, time of exercise equal to 480 months

une période de 480 mois, soit 40ans. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798^9$. La figure 7 représente une trajectoire d'exploitation qui ont pour contrainte spécifique qu'elle doit être viable. La sortie graphique du modèle GAIA SCOPE est la suivante.

- **La succession de culture proposé par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

1 cycle de production de canne à sucre

1 cycle de production banane plantain

1 cycle de production canne à sucre

10 ans de jachère longue

10 ans de banane plantain

3 ans de jachère longue

⁹ • I est une variable discrète représentant un indicateur de qualité de sol mesuré au début du cycle de production.

• τ , est une variable discrète qui fournit la date du début du cycle de production en cours.

• w : est une variable continue décrivant le revenu cumulé acquis au début du cycle de production.

5 ans de jachère courte

- **Etat initial :**

La figure 8 modélise des exploitations agricoles avec les cultures d'exportation : canne et banane sur une période de 480 mois, soit 40ans. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole

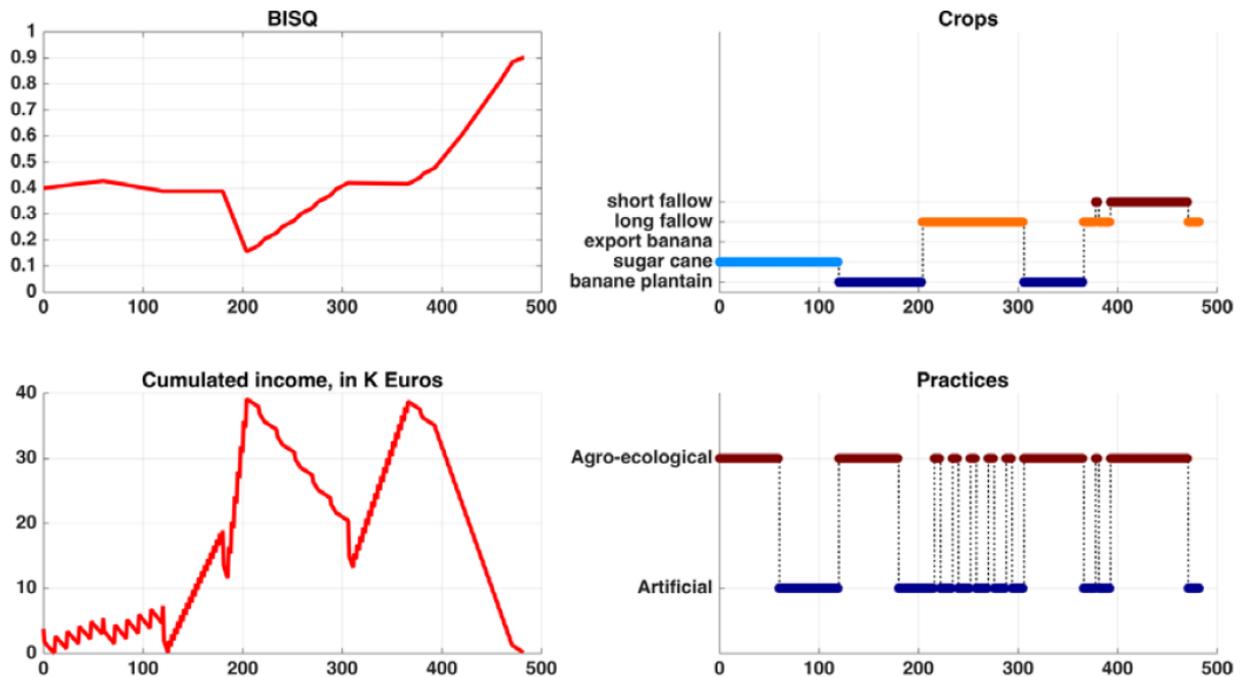


FIGURE 8 Farm management trajectory starting with an initial capital equal to the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798$. Export market farming (banana-sugar cane), viable trajectory with imposed crop shift whenever it allows to stay viable, time of exercise equal to 480 months

commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798$ ¹⁰. La contrainte spécifique de cette situation est d'avoir une trajectoire viable avec changement de culture imposé chaque fois que cela est possible.

- **La succession de culture proposé par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

2 cycles de production de canne à sucre

2 cycles de production de banane plantain

¹⁰ • I est une variable discrète représentant un indicateur de qualité de sol mesuré au début du cycle de production.

• τ , est une variable discrète qui fournit la date du début du cycle de production en cours.

• w : est une variable continue décrivant le revenu cumulé acquis au début du cycle de production.

8.3 ans de jachère longue

1 cycle de production de banane plantain

8.5 ans d'alternance de jachère longue et courte.

- **Etat initial :**

La figure 9 modélise des exploitations agricoles avec les cultures d'exportation : canne et banane sur une période de 480 mois, soit 40ans. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798$. La contrainte spécifique de cette figure est d'avoir une trajectoire viable, tout en minimisant w à chaque nouvelle récolte.

- **La succession de culture proposé par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

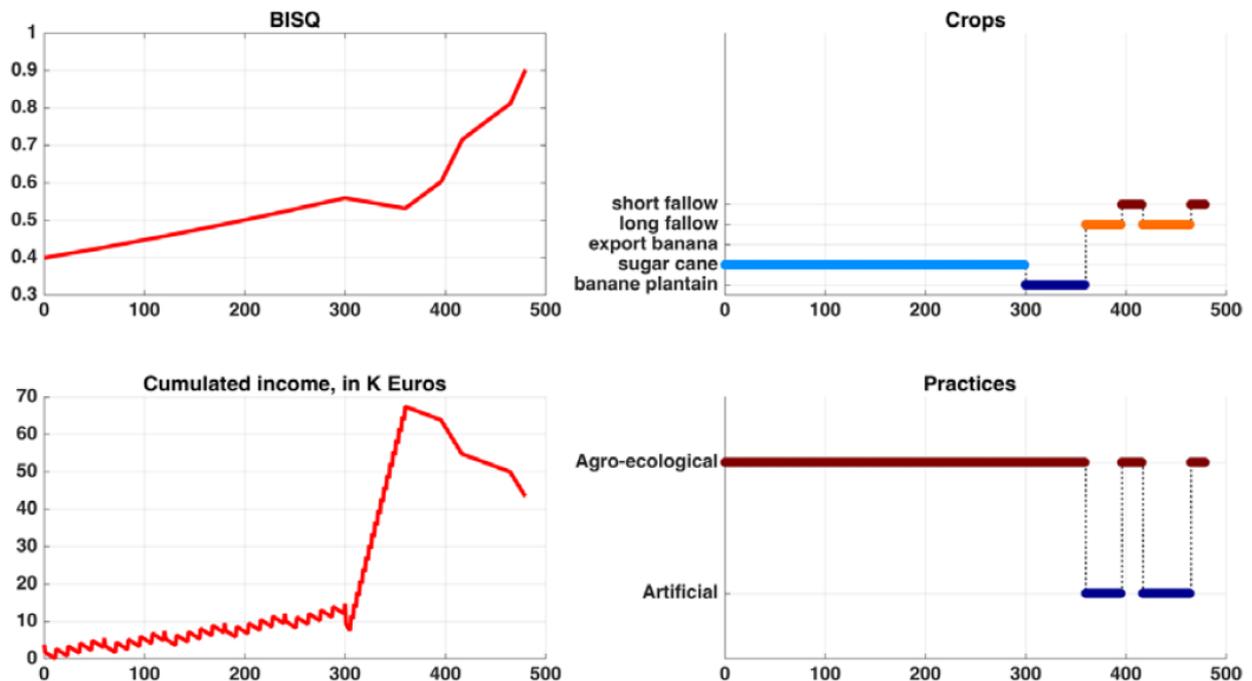


FIGURE 9 Farm management trajectory starting with an initial capital equal to the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3798$. Export market farming (banana-sugar cane), viable trajectory with controls minimizing w at each new crop, time of exercise equal to 480 months.

5 cycles de production de canne à sucre

1 cycle de production banane plantain

10 ans d'alternance de courte et longue période de jachère.

- **Etat initial :**

Les figure 10 présentent les sorties du modèle pour des exploitations agricoles destinées au marché local avec des production végétales de diversification. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$ et des charges fixes $Cf = 100$. La contrainte spécifique de cette figure est : les condition initiales suivantes $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3112$, sur une durée de 480 mois soit 40 ans.

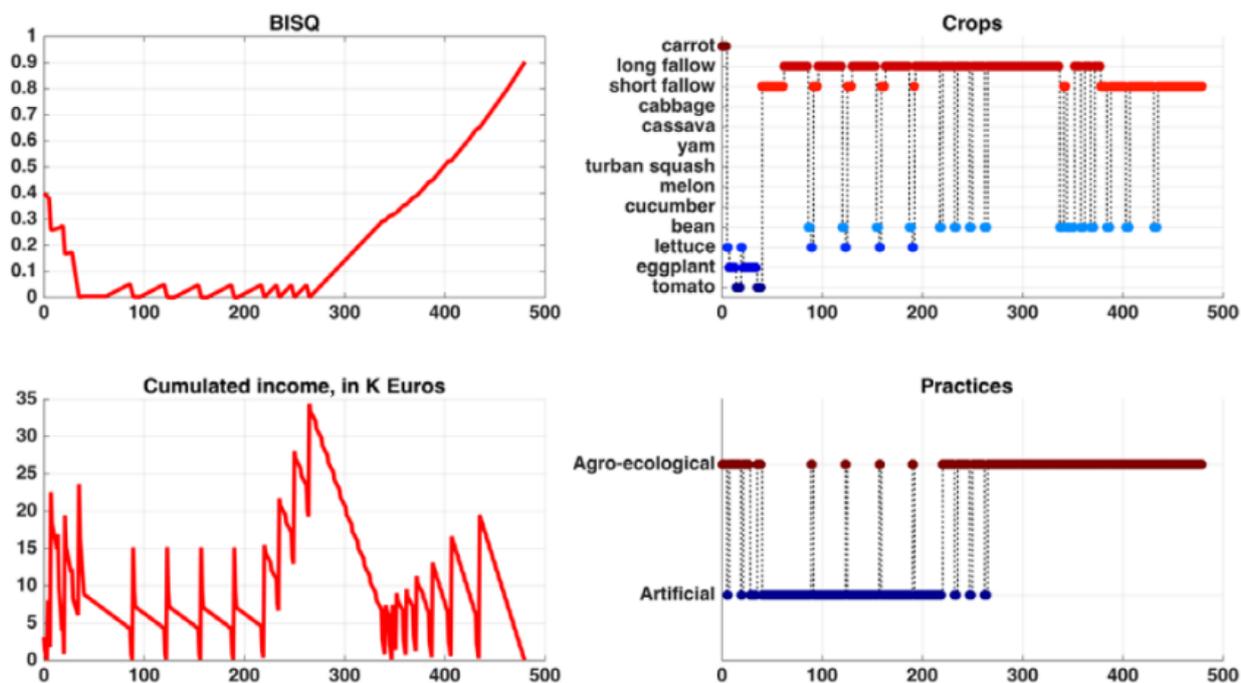


FIGURE 10 Farm management trajectory starting with an initial capital equal to the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 0$, $w_0 = W(0.4, 0) = 3112$. Local market farming (diversified vegetable crops), fixed charges $C_f = 100$, time of exercise equal to 480 months

- **La succession de culture proposée par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

- 1 cycle de production de carotte
- 1 cycle de production de laitue
- 1 cycle de production d'aubergine
- 1 cycle de production de tomate
- 1 cycle de production de laitue
- 1 cycle de production d'aubergine
- 1 cycle de production de tomate
- Jachère courte
- Jachère longue
- 1 cycle de production de haricot
- 1 cycle de production de laitue

Puis une alternance de jachère plus ou moins longue avec des cycles de production de laitue.

- **Etat initial :**

Les figure 11 présentent les sorties du modèle pour des exploitations agricoles destinées au marché local avec des production végétales de diversification. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$ et des charges fixes $C_f = 100$. La contrainte spécifique pour cette figure : les conditions initiales suivantes $\tau = 240$, $w_0 = (0.4, 240) = 3112$, sur une durée de 240 mois soit 20 ans.

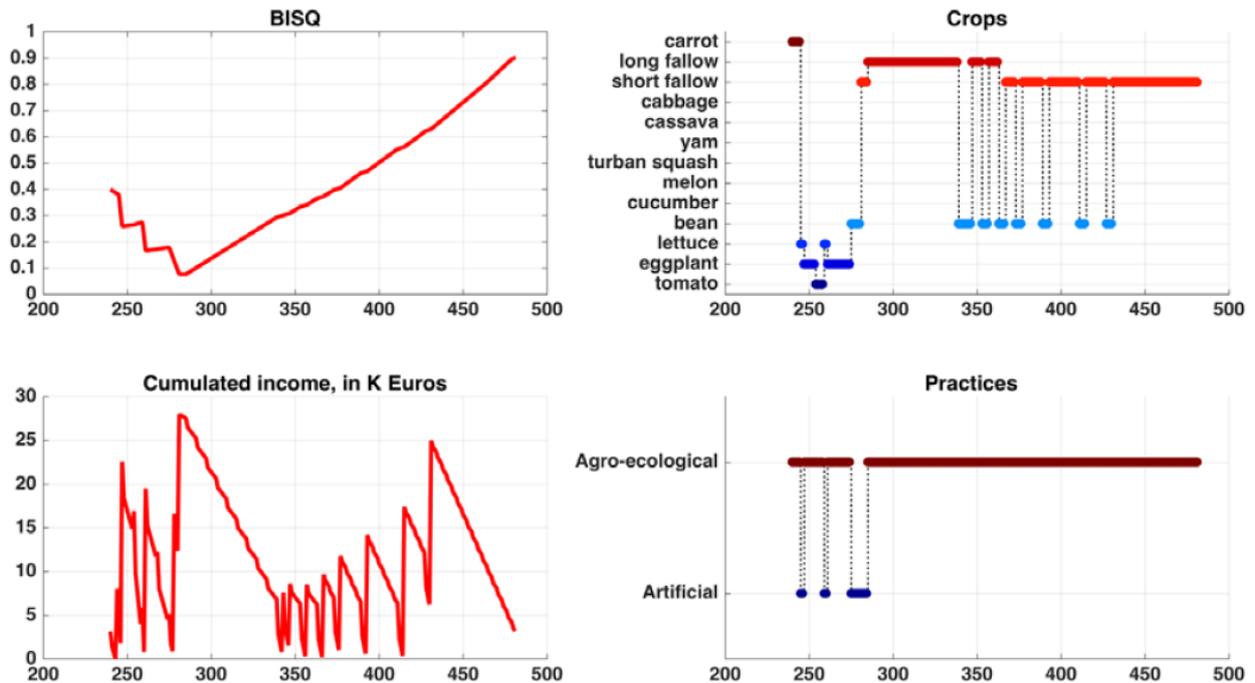


FIGURE 11 Farm management trajectory starting with an initial capital equal to the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 240$, $w_0 = W(0.4, 240) = 3112$. Local market farming (diversified vegetable crops), fixed charges $C_f = 100$, time of exercise equal to 240 months

- **La succession de culture proposée par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

- 1 cycle de production de carotte
- 1 cycle de production de laitue
- 1 cycles de production d'aubergine
- 1 cycle de production de tomate
- 1 cycle de production de laitue
- 2 cycles de production d'aubergine

Puis une alternance de périodes de jachère plus ou moins longue avec des périodes de production de haricot. A un moment 2 cycles de production de haricot se suivent.

- **Etat initial :**

Les figures 10 présentent les sorties du modèle pour des exploitations agricoles destinées au marché local avec des productions végétales de diversification. Avec des trajectoires de gestion de l'exploitation agricole commençant avec un capital financier initial égal au coût minimum de la restauration du sol, Condition initiale $I = 0.4$ et des charges fixes $C_f = 100$. La contrainte spécifique pour cette figure : les conditions initiales suivante $\tau = 378$, $w_0 = W(0.4, 378) = 21932$, sur une durée de 102 mois soit 8.5 ans.

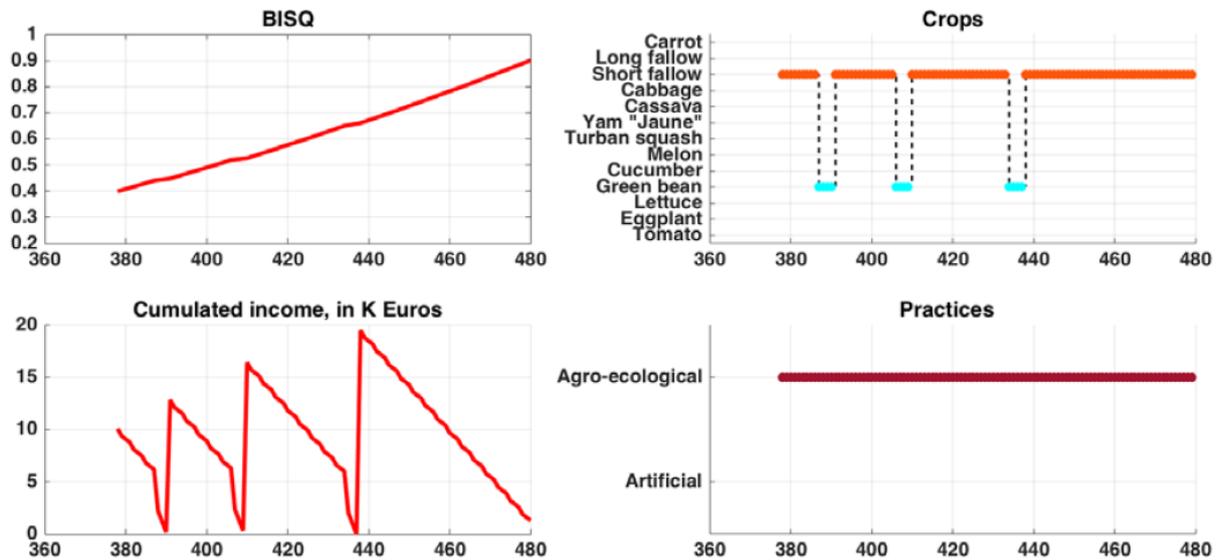


FIGURE 12 Farm management trajectory with the minimum cost of restoration, initial condition $I = 0.4$, $\tau = 378$, $w_0 = W(0.4, 378) = 21932$, “local market farming,” diversified vegetable crops, fixed charges $C_f = 100$, time of exercise equal to 102 months

- **La succession de culture proposée par le modèle GAIA SCOPE est la suivante :**

8 mois de jachère courte

1 cycle de production de haricot vert

18 mois de jachère courte

1 cycle de production de haricot vert

25 mois de jachère courte

1 cycle de production de haricot vert

42 mois de jachère courte

Annexe 21 : Succion de culture traditionnelle hérité de la pratique du jardin créole dans les Antilles française.

Succession traditionnelle :

Année	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5
Spéculation						

Légende :

	Igname
	Culture vivrière
	Jachère pâturée ou non

Succession aujourd'hui en Guadeloupe :

Année	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5	N+6	N+7	N+8
Spéculation									

Légende :

	Canne à sucre
	Igname

Année	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5	N+6
Spéculation							

Légende :

	Canne à sucre
	Igname
	Culture maraichère

Année	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5	N+6	N+7
Spéculation								

Légende :

	Canne à sucre
	Igname
	Ananas bouteille

Succession aujourd'hui en Martinique :

Année	N	N+1	N+2	N+3
Spéculation				

Légende :

-  Igbame
-  Culture vivrière
-  Jachère pâturée ou non

Annexe 22 : Scripte Matlab permettant d'évaluer les trajectoires d'exploitations.

```
clear all;
GlobalData;

global specNames
global EcoData agroData

Cf=100;

initI=0.4;
initW=3112;
initTime=0;

finalTime=480;

controls=load('figure7.txt');
nbCycles=size(controls,1);
specNumbers=zeros(nbCycles,1);

for i=1:nbCycles
    if(controls(i,2)==1)
        specNumbers(i)=2*controls(i,1)-1;
    else
        specNumbers(i)=2*controls(i,1);
    end
end
specNumbers

time=initTime;
numCycle=1;
revenuCumul=initW;
I=initI;

IBQS=[I];
W=[revenuCumul];
months=[time];
dataCycle=zeros(16,1);
specs=[controls(1,1)];
pratiques=[controls(1,2)];

while( (time<=finalTime) && ( numCycle<=nbCycles))
    numSpec=specNumbers(numCycle)
```

```

data(1)=agroData(numSpec,1); %delta
data(2)=agroData(numSpec,2); %r_i
data(3)=agroData(numSpec,8); %Rm
data(13)=agroData(numSpec,6); %f_c
data(14)=agroData(numSpec,7); %p_c

```

```

data(4)=agroData(numSpec,3); %rd

```

```

data(5)=agroData(numSpec,4); %rp
data(6)=agroData(numSpec,5); %rap

```

```

data(7)=EcoData(numSpec, 1);
data(8)=EcoData(numSpec, 2);
data(9)=EcoData(numSpec, 3);
data(10)=EcoData(numSpec, 4);
data(11)=EcoData(numSpec, 8);
data(12)=EcoData(numSpec, 6);

```

```

data(15)=EcoData(numSpec, 7);
data(16)=EcoData(numSpec, 5);

```

```

ri=data(2);
Rm=data(3);
rd=data(4);
rp= data(5);
rap=data(6);

```

```

dureeCycle=agroData(numSpec, 1);
dlb=calculDeltaBiomasse(l,ri,Rm,rd);
dIp=calculDeltaPratique(l,rp,rap);

```

```

lnew=l-dlb+dIp;
Delta=lnew-l;
tau=1;
ltemp=l;
while((tau<=dureeCycle) && (time<=finalTime))
    revenuCumul=revenuCumul+bilanMois(ltemp,tau,data,Cf);
    l = l +Delta/dureeCycle;
    time=time+1;
    IBQS=[IBQS l];
    W=[W revenuCumul];
    months=[months time];

```

```

    specs=[specs controls(numCycle,1)];
    pratiques=[pratiques controls(numCycle,2)];
    tau=tau+1;
end

    numCycle=numCycle+1 ;
end

nbSpecs=17;
practNames={'Artificial', 'Agro-ecological'};

col2='b';
col1='r';
%ouverture de la fenetre graphique
figure(1);

% subplot permet de diviser une fenetre graphique en plusieurs zones
% disposées en matrice et de tracer des graphes dans les différentes zones
% ici on divise la fenetre en 4 zones, disposées en matrice 2 x 2

subplot(2,2,1);
%commande qui desine un graphique
%le premier argument est la liste des coordonnées d'abscisse
%le second est la liste des coordonnées d'ordonnées
% ensuite il peut y avoir plusieurs arguments optionnels qui
%permettent de définir le style de tracé
%ici on utilise la couleur col1, bleu , et la largeur de ligne en pixels, 3

plot(months, IBQS, col1, 'LineWidth', 3 );

%affichage du titre
title('BISQ','FontSize',14,'FontWeight','bold');
% modification des marques d'ordonnées
set(gca, 'YTick',0:0.1:1)
%modification de la taille de police de caractères
set(gca,'FontSize',14,'FontWeight','bold');
% tracer la grille
grid on;

subplot(2,2,2);
hold on; grid on;
colormap(hsv)

stairs(months, specs, 'k--', 'LineWidth', 1);
scatter(months, specs,5,specs, 'fill');
title(' Crops ', 'FontSize',14,'FontWeight','bold');
set(gca, 'YLim',[0.5 17.5], 'YTick',1:nbSpecs,'YTickLabel',specNames)

```

```

%set(gca, 'XTick',times/12)
set(gca,'FontSize',14,'FontWeight','bold');

subplot(2,2,3);
hold on;

grid on;

plot(months, W, col1, 'LineWidth', 3);
title('Cumulated income, in K Euros','FontSize',14,'FontWeight','bold');
grid on;
set(gca,'FontSize',14,'FontWeight','bold');

subplot(2,2,4);
colormap(jet)
hold on;

stairs(months, pratiques, 'k--', 'LineWidth', 1);
scatter(months, pratiques,5,pratiques, 'fill');
title('Practices ', 'FontSize',14,'FontWeight','bold');
set(gca, 'YLim',[0.5 2.5], 'YTick',1:2,'YTickLabel',practNames)
set(gca,'FontSize',14,'FontWeight','bold');
grid on;

```

Integrating agronomic variables within tropical island agrosystems sustainability modelling

Abstract

Tropical island territories are strongly affected by global climate change. **The French West Indies** depicts the diversity of issues related to **viability** of **agro-systems**, which are becoming even more important as the climate is changing. The **GAIA SCOPE** model was born from a multi-disciplinary and multi-partners collaboration between INRA, CIRAD and Paris Dauphine University. This model based on the **Theory of Viability** (Aubin 2009) enables to identify viable **farming system**, which must improve or at least maintain **soil quality** (defined by the **BISQ** indicator) and financial situation of the farm (defined by the **cumulative income**). Farming systems are defined by **crop rotations** and associated **cultural practices** over 40 years, considered as a long period of time.

The lack of agronomic **decision rules** for defining crop rotation is making the model inconsistent when picking a rotation. This study aims at identifying decision rules for a better control of the crop rotation definition by the model. Therefore, the main question is: "How to make the GAIA SCOPE model agronomically consistent and representative of Guadeloupian farming systems?".

Based on literature and interviews with INRA agents, we have identified 5 types of decision rules making the model more efficient on the agronomic aspect, which are the following:

- Selecting successive crops that belong to different **botanical families**.
- Limiting pathogen outbreak development by limiting the number of **diseases and pests** common to successive crops.
- Reducing **mineral stock** depletion by selecting crops which do not require high amounts of same minerals (Nitrogen, Phosphate, Potassium and Organic matter)
- Optimizing crops successions enabling high root **soil decompaction**.
- Respecting crop **seasonality**.

The efficiency of these decision rules is assessed using 6 examples of model trajectories, where inconsistencies are highlighted and new trajectories are proposed. The new agronomically efficient trajectories on the themes proposed in the decision rules do not systematically allow the improvement of the financial performances, nor the soil quality. The viability parameters considered by the model do not take into account the impact of the agronomic improvements proposed by the decision rules, an extinction of the trajectory evaluation parameters could be integrated to refine the model.

Keywords :

French West Indies - Viability - Agro systems - Farming trajectory - Crop succession - Cultural practices - Decision rules.

Intégration de critères agronomiques dans la modélisation de la viabilité des agrosystèmes insulaires tropicaux

Résumé

Les territoires insulaires tropicaux sont fortement touchés par les changements climatiques globaux. Les **Antilles françaises** cristallisent la diversité des problématiques liées à la **viabilité** des **agro systèmes** si importants dans le contexte de changements globaux. Le **modèle GAIA SCOPE**, issu d'une collaboration pluridisciplinaire et pluri partenaire entre l'INRA, le CIRAD et l'Université Paris dauphine, a vu le jour en 2013(OZIER-LAFONTAINE 2012). Ce modèle basé sur **la théorie de la viabilité** (Aubin 2009) permet d'identifier des **trajectoires d'exploitations** agricoles viables. Elles sont viables au sens d'une amélioration ou tout du moins d'un maintien de la **qualité de sol** exprimé par l'indicateur **BISQ** et par une amélioration ou un maintien de l'état économique de l'exploitation exprimé par le **revenu cumulé**. Les trajectoires d'exploitations sont exprimées graphiquement par les **successions de cultures** mises en place et les **pratiques de cultures** qui y sont associées sur une longue période de temps, 40 ans.

L'absence de règles de décision agronomique dans le choix des successions de culture, provoque certaines incohérences dans les successions culturales proposées par le modèle. L'objectif de ce travail est d'identifier des **règles de décision** permettant d'encadrer le choix des successions culturales. La problématique est la suivante : « Comment rendre le modèle GAIA SCOPE agronomiquement cohérent et représentatif de l'agriculture guadeloupéenne ? ».

A partir de recherches bibliographiques approfondies et de dires d'experts, nous avons identifié 5 thématiques sur lesquelles sont portées les règles de décisions permettant d'enrichir le modèle sur le plan agronomique :

- L'appartenance des cultures qui se suivent dans la succession à des **familles botaniques** différentes.
- Eviter la formation de foyers de pathogènes en limitant le nombre de **maladies et ravageurs** partagés par les cultures qui se suivent dans une succession de culture.
- Eviter l'épuisement des **ressources minérales** du sol en faisant se succéder des spéculations prélevant les éléments minéraux : Azote, Phosphate et Potassium dans des proportions différentes.
- Optimiser les successions de cultures pour que l'effet des racines sur la **décompaction du sol** soit positif.
- Respecter **la saisonnalité des cultures** pour leur mise en culture.

L'efficacité de ces règles de décision est évaluée sur 6 exemples de trajectoires du modèle, les incohérences sont mises en évidence et de nouvelles trajectoires sont proposées. Les nouvelles trajectoires agronomiquement performantes sur les thématiques proposées dans les règles de décisions ne permettent pas systématiquement l'amélioration des performances économiques à travers le revenu cumulé, ni la qualité de sol évaluée par l'indicateur BISQ. Les paramètres de viabilité pris en compte par le modèle ne prennent pas en compte les répercussions des améliorations agronomiques proposées par les règles de décision, une extinction des paramètres d'évaluation des trajectoires pourrait être incorporée pour affiner le modèle.

Mots clefs :

Antilles Françaises - Viabilité - Agro systèmes - Trajectoire d'exploitation - Successions de cultures - Pratiques de culture - Règles de décisions.