



HAL
open science

Évaluation multicritères de la durabilité de systèmes de culture bananiers innovants en Guadeloupe : Adaptation et utilisation de l'outil MASC

Jérôme Tirolien

► To cite this version:

Jérôme Tirolien. Évaluation multicritères de la durabilité de systèmes de culture bananiers innovants en Guadeloupe : Adaptation et utilisation de l'outil MASC. [Stage] France. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Clermont-Ferrand (ENITAC), Clermont-Ferrand, FRA. 2009, 105 p. hal-02823922

HAL Id: hal-02823922

<https://hal.inrae.fr/hal-02823922v1>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

ENITA de Clermont-Ferrand
Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Evaluation multicritères de la durabilité
de systèmes de culture bananiers
innovants en Guadeloupe : Adaptation
et utilisation de l'outil MASC

Jérôme Tirolien

Agronomie, Productions Végétales et Environnement

2009



Unité de recherche AgroPédoClimatique de la zone Caraïbe



ENITA de Clermont-Ferrand

Evaluation multicritères de la durabilité
de systèmes de culture bananiers
innovants en Guadeloupe : Adaptation
et utilisation de l'outil MASC

Jérôme Tirolien

Agronomie, Productions Végétales et Environnement

2009

Maîtres de stage : Jean-Louis Diman et Jean-Marc Blazy

Tuteur de pédagogie : Christophe Poix

Co-tuteur pédagogique : Nathalie Vassal



Unité de recherche AgroPédoClimatique de la zone Caraïbe



L'ENITA Clermont-Ferrand n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans ce rapport ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.



TIROLIEN, Jérôme, 2009. *Evaluation multicritères de la durabilité de systèmes de culture bananiers innovants en Guadeloupe : Adaptation et utilisation de l'outil MASC*, 87 pages, mémoire de fin d'études, Clermont-Ferrand, 2009.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ◆ Unité de recherche AgroPédoClimatique de la zone Caraïbe (UR APC), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Antilles-Guyane.
Domaine de Duclos, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe

ENCADRANTS :

- ◆ Maîtres de stages : DIMAN, Jean-Louis (UR APC, INRA)
BLAZY, Jean-Marc (UR APC, INRA)
- ◆ Tuteur pédagogique : POIX, Christophe (ENITAC)
- ◆ Co-tuteur pédagogique : VASSAL, Nathalie

OPTION : Agronomie, Productions Végétales et Environnement

RESUMÉ

La culture de la banane en Guadeloupe s'est développée selon une logique de monoculture intensive à haut niveau d'intrants. Si cette production constitue un pilier de l'économie de l'île, depuis quelques années, elle traverse une crise économique et environnementale. Face à cette situation de crise, une des solutions proposées consiste à proposer des systèmes de culture innovants plus durables. L'évaluation et la conception de systèmes innovants nécessite l'utilisation d'outils de modélisation et d'évaluation.

L'unité de recherche agropédoclimatique (UR APC) de l'INRA (Institut Nationale de la Recherche Agronomique) a développé, un programme de conception de systèmes de culture de bananiers innovants et 18 prototypes de systèmes de culture ont été mis au point. Les performances agronomiques ont été simulées par le modèle SIMBA. La méthode MASC (Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems) a été adaptée au contexte de la culture de la banane en Guadeloupe pour évaluer la durabilité globale des prototypes. L'évaluation a été menée en tenant compte de la typologie des exploitations bananières de la région.

Ainsi, parmi les 18 prototypes, deux obtiennent une durabilité globale moyenne à élevée chez l'ensemble des types et semblent prometteuses. D'autres plus spécifiques à un des types d'exploitation ont une durabilité globale moyenne. Pour la suite, ces prototypes sont à tester *in situ* pour évaluer leurs performances fonctionnelles et agronomiques.

L'outil MASC s'est révélé approprié par sa structure est suffisamment souple pour être adaptée à des contextes particuliers. Il permet de discriminer de manière assez satisfaisante une large gamme de systèmes de culture innovants.

Mots clés : Banane, durabilité, évaluation, Guadeloupe, évaluation *ex ante*, évaluation multicritère, système de culture bananier, système de culture innovant.

ABSTRACT

Banana's production in Guadeloupe was developed on intensive monoculture logic with high level of inputs. Currently, this production is cutting through an economic and an environmental crisis. Faced with this crisis, one solution is to propose sustainable innovative cropping systems. Evaluation and design of innovative systems requires the use of tools in modeling and assessment.

The research unit 'AgroPedoClimatique' of the National Institute for Agricultural Research has developed a program to design banana innovative cropping systems. 18 prototypes of innovative cropping systems have been developed. The agronomic performances were simulated by the SIMBA model. The method MASC (Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping Systems) has been adapted to the context of growing bananas in Guadeloupe to evaluate the overall sustainability of prototypes. The evaluation was conducted taking into account the type diversity of banana farms in the region.

Thus, among the 18 prototypes, both get an overall sustainability from medium to high in all types and seem promising. Other prototypes are specific for a given farm type and have a medium overall sustainability. For more, these prototypes have to be tested in situ to assess their agronomic performance and functional.

MASC was appropriated for its structure sufficiently flexible to be adapted to specific contexts. It can discriminate quite satisfactorily a wide range of innovative cropping systems.

Key words: Banana, banana cropping system, *ex ante* evaluation, Guadeloupe, innovative cropping system, multicriteria assessment, sustainability assessment.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord les membres de l'équipe au sein de laquelle j'ai effectué mon stage : Jean-Marc Blazy, François Causseret et Jean-Louis Diman, pour leur pédagogie et le plaisir que j'ai eu à travailler avec eux.

Je remercie aussi les autres chercheurs qui ont m'ont consacré de leur temps pour répondre à mes nombreuses question : Régis Tournebize, François Bussière, Yves-Marie Cabidoche.

De même, je remercie Christophe Poix (ENITA), mon tuteur de stage, pour ses conseils méthodologiques.

Mes remerciements vont également aux secrétaires aux techniciens et les VATs, pour leur accueil, leur bonne humeur.

Enfin je remercie les autres stagiaires, Natalie, Jonathan, Lise et Djalim qui ont su animer la vie du stage dans le bureau des stagiaires.

Table des matières

I. Introduction : contexte et objectifs du stage	1
I. 1. Concevoir et évaluer des systèmes de cultures plus durables	1
I. 2. Objectifs et contexte du stage	3
II. Etat de l'art sur les méthodes et outils pour l'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles.	19
III. Méthode de travail	25
III. 1. Choix du modèle MASC	25
III. 2. Description de MASC	25
III. 3. Adaptation de MASC	27
III. 4. Caractérisation des systèmes de culture	33
III. 5. Signification des classes	33
III. 6. Prise en compte d'une typologie de systèmes de culture représentative de la diversité régionale.	35
IV. Résultats	37
IV. 1. Durabilité actuelle des exploitations	37
IV. 2. Evaluation <i>ex ante</i> de la durabilité des systèmes de cultures innovants	41
V. Discussion	51
V. 1. Les objectifs sont-ils atteints ?	51
V. 2. Les limites de notre étude	51
V. 3. Perspectives	53
VI. Conclusion	55
Références bibliographiques	57
Annexes	63

Table des figures

Figure 1. Structure de la démarche de prototypage de systèmes de culture	2
Figure 2. Carte de l'archipel des Caraïbes.....	2
Figure 3. Carte de l'archipel de la Guadeloupe	4
Figure 4. Carte des isohyètes annuelles.....	4
Figure 5. Normales de températures et de précipitations (1971-2000) au Raizet.....	5
Figure 6. Répartition de l'emploi salarié par secteur en 2007.....	6
Figure 7. Répartition des types de sol de la Guadeloupe.....	6
Figure 8. Répartition des exportations en valeur en 2007.....	8
Figure 9. Evolution du tonnage de bananes produites et exportées.....	8
Figure 10. Sole bananière de la Guadeloupe en 2008.....	10
Figure 11. Vue schématique d'un bananier à la fructification et de ses rejets.....	12
Figure 12. Cadre méthodologique pour l'évaluation <i>ex ante</i> de systèmes de culture innovants, de la conception à l'adoption	14
Figure 13. Arbre hiérarchique de MASC	24
Figure 14. Démarche d'évaluation de systèmes de culture avec l'aide de MASC.....	26
Figure 15. Arborescence de MASC-Banane	28
Figure 16. Arbre hiérarchique de MASC-Banane et poids choisis pour l'étude en Guadeloupe.....	30
Figure 17. Notes obtenues de durabilité totale	36
Figure 18. Notes obtenues pour les 3 dimensions de la durabilité totale.....	36

Table des tableaux

Tableau 1. Production de l'agriculture en millions d'euros courants (y. c. subventions).....	8
Tableau 2. Typologie des systèmes de culture de la région.....	16
Tableau 3. Description des différentes innovations.....	18
Tableau 4. Comparaison de 4 méthodes d'évaluation de la durabilité.....	22
Tableau 5. Caractérisation et transformation en classe qualitatives de l'innovation 1 (suppression des traitements nématicides) chez le type 1.....	32
Tableau 6. Quelques paramètres spécifiques au type de système de culture dans les simulations SIMBA et BANAD et quelques résultats des simulations.....	34
Tableau 7. Résultats d'évaluation et évolution de la durabilité totale par rapport à la situation actuelle sans innovation.....	40
Tableau 8. Résultats d'évaluation et évolution de la note de durabilité économique par rapport à la situation actuelle.....	42
Tableau 9. Résultats d'évaluation et évolution de la note d'acceptabilité sociale par rapport à la situation actuelle.....	44
Tableau 10. Résultats d'évaluation et évolution de la note de durabilité environnementale par rapport à la situation actuelle.....	46
Tableau 11. Sélection des innovations pour lesquelles chacune des 3 dimensions de la durabilité totale obtient une note élevée.....	48

Table des abréviations

ADAMA : Analyse de la Durabilité Axée sur des Mesures Adaptées

AGRIGUA : Association Guadeloupéenne de Recueil d'Informations Géographiques d'Utilité Agricole.

CIRAD-FLHOR : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement - Département des productions fruitières horticoles

DISCOTECH : DISpositif innovants pour la Conception et l'évaluation des systèmes TECHniques

ETP : Evapotranspiration potentielle

IDEA : Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles

IEDOM : Institut d'Emission des Départements d'Outre-Mer

INDIGO : INDicateurs de Diagnostic Global à la parcelle

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

LPG : Les Producteurs de Guadeloupe

MASC : Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems

MCDA : Multi-Criteria Decision-Aid, aide à la décision multicritère

MOTIFS : MOnitoring Tool for Integrated Farm Sustainability

ODEADOM : Office de Développement de l'Economie Agricole d'Outre-Mer

RISE : Response-Inducing Sustainability Evaluation (voir ADAMA)

SARL : Société A Responsabilité Limitée

SAU : Surface Agricole Utile

SdC : Système de Culture

SHE : Sortie Hangar d'Emballage

SICA : Société d'Intérêt Collectif Agricole

UE : Union Européenne

UGPBAN : Union des Groupements de Producteurs de BANanes

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

UR APC : Unité de Recherche AgroPédoClimatique

UTA : Unité de Travail Agricole

WCED : World Commission on Environment and Development

I. Introduction : contexte et objectifs du stage

I. 1. Concevoir et évaluer des systèmes de cultures plus durables

Depuis la Seconde Guerre mondiale, l'agriculture a connu un formidable progrès, augmentant la productivité par hectare et par travailleur. Mais le développement d'une agriculture productiviste a eu des conséquences environnementales, économiques et sociales néfastes telles que la pollution des eaux, la réduction de la fertilité des sols et depuis quelques années, la réduction du revenu des agriculteurs et l'éclatement des communautés rurales (Schaller, 1993).

Dans ce contexte, les modes de production actuels sont fortement remis en question. La culture de la banane aux Antilles n'est qu'un exemple de la situation de l'agriculture mondiale. En effet, depuis les années 90, cette production traverse une grave crise économique et environnementale. Les difficultés économiques s'expliquent par la libéralisation du marché, la forte compétitivité des pays producteurs d'Amérique Latine et d'Afrique et l'augmentation des coûts de production. La monoculture intensive à hauts niveaux d'intrants suscite une forte pression sur l'environnement : récente et très médiatisée pollution par la chlordécone des eaux de certains captages ; prolifération des parasites telluriques et aériens ; diminution de la fertilité physicochimique des sols (Dulcire et Cattan, 2002).

Face à cette situation de crise, une des solutions proposées consiste à repenser les systèmes agricoles dans leur globalité. Ainsi, de nombreux instituts et organismes de recherche s'orientent vers la conception de systèmes innovants plus durables. Dans cette démarche, après avoir défini les problèmes et identifié ce qui doit être amélioré, des systèmes innovants sont générés. L'évaluation est une étape importante car elle permet alors d'identifier rapidement a priori les systèmes durables. Mais l'évaluation de la durabilité n'est pas aisée compte tenu de son caractère multidimensionnel.

Dans l'expression Agriculture Durable, l'importance du terme *durable* peut être attribuée au rapport de la Commission Brundtland, *Our Common Future* (WCED, 1987) qui définit le *développement durable* comme "un développement économique assurant les besoins actuels sans compromettre ceux des générations futures".

Il existe de nombreuses définitions pour l'agriculture durable (Hansen, 1996). Selon Ikerd (1993) c'est une agriculture capable de maintenir sa productivité et sa fonction pour la société indéfiniment. Harwood (1990 in Hansen, 1996) l'étend à l'ensemble des espèces mais en gardant une vision anthropocentrique, définissant une agriculture capable d'évoluer indéfiniment vers une plus grande utilité pour l'homme, vers une meilleure efficacité de l'emploi des ressources et vers un équilibre avec le milieu qui soit bénéfique à la fois pour l'homme et pour la plupart des autres espèces. Pour la plupart des gens, c'est une agriculture écologiquement saine, économiquement viable, socialement juste et humaine.

La durabilité des systèmes de culture actuels doit donc être améliorée et l'innovation apparait nécessaire pour atteindre cet objectif.

Un système de culture est *l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de façon identique* ; il est défini par une succession de cultures, chaque culture (d'une espèce ou d'une association d'espèces) étant conçue comme *une combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu pour en tirer une production donnée* (Sebillotte, 1990). L'innovation décrit une invention qui introduit un degré de changement par rapport à l'existant. Un système de culture innovant est alors un système de culture qui diffère de l'actuel par les modalités techniques mises en œuvre.

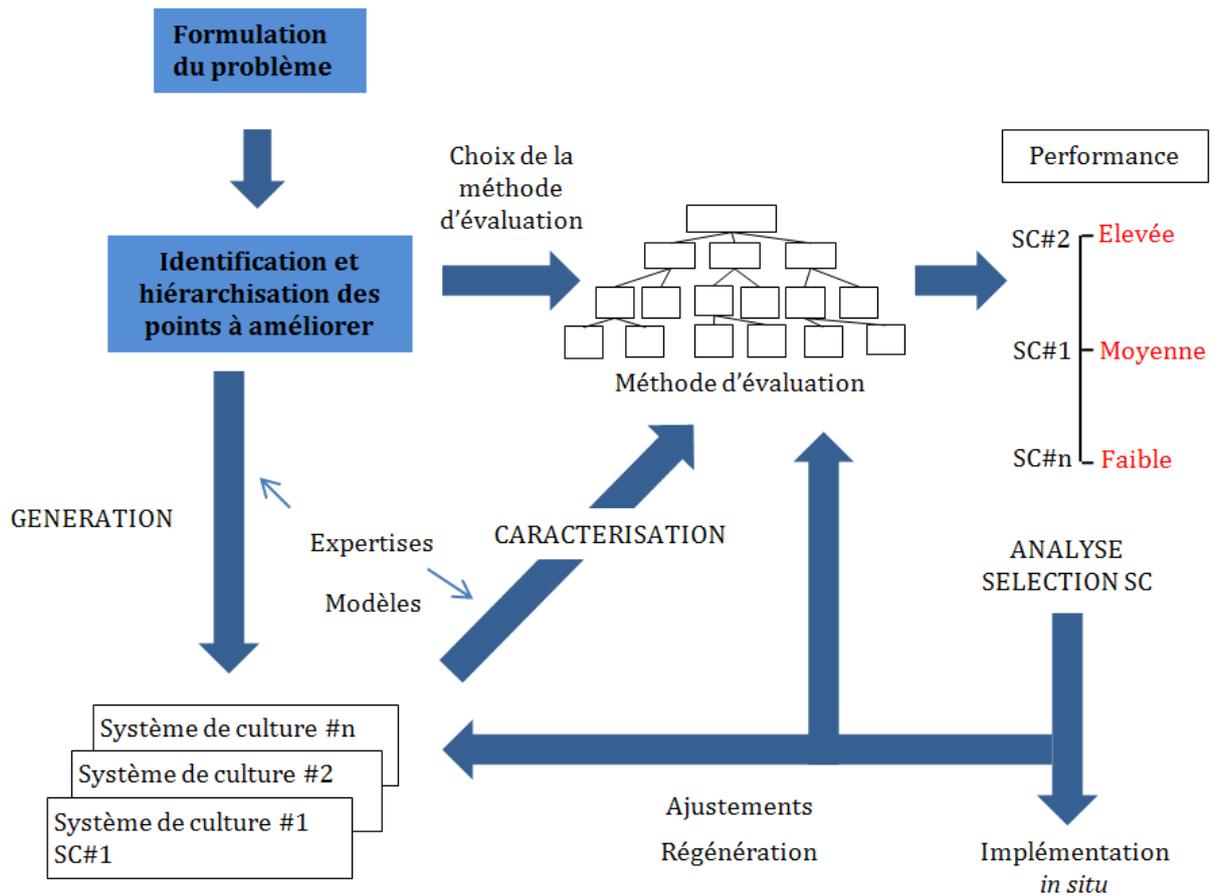


Figure 1. Structure de la démarche de prototypage de systèmes de culture



Figure 2. Carte de l'archipel des Caraïbes
(Source : www.primeahotels.com)

L'évaluation de systèmes de culture par une approche expérimentale est longue et coûteuse. Le recours à une évaluation *ex ante* permet de contourner ces contraintes et d'identifier rapidement les systèmes de culture innovants pertinents (Van Ittersum *et al.*, 2008 ; Sadok *et al.*, 2008). L'évaluation *ex ante* est une étape importante faisant partie intégrante d'une démarche de prototypage de systèmes de culture. Cette démarche de prototypage peut se résumer en huit étapes (**Figure 1**) (Angevin *et al.*, com. pers.) :

- i. formulation du problème et identification des points à améliorer
- ii. génération des systèmes de culture par expertise ou à l'aide de modèles (*in silico*)
- iii. choix de la méthode d'évaluation
- iv. caractérisation des systèmes de culture (données requises par la méthode d'évaluation)
- v. réalisation de l'évaluation
- vi. analyse et interprétation des résultats (classement obtenu)
- vii. réajustements des systèmes de culture et/ou de la méthode d'évaluation
- viii. implémentation *in situ* des systèmes de culture sélectionnés et évaluation *ex post* de leurs performances

Les étapes ne sont pas menées de façon séquentielle, leur conduite s'effectue par recouvrements.

I. 2. Objectifs et contexte du stage

I. 2. 1. Le contexte d'étude

I. 2. 1. 1. La situation géographique

La Guadeloupe (16°N, 61°O) est une région française monodépartementale située dans l'arc des Petites Antilles (**Figure 2**).

Cet archipel de 1 702 km² regroupe huit îles habitées : deux îles principales – la Basse-Terre (848 km²) et la Grande-Terre (590 km²) – et les dépendances – Marie-Galante, La Désirade, Les Saintes à proximité (**Figure 3**). A 200 km plus nord, se trouvent Saint-Martin et Saint-Barthélemy, communément appelées les Iles du Nord qui ont acquis le statut de Collectivité d'Outre-Mer en février 2007. Les deux îles principales sont séparées par un étroit bras de mer, la Rivière Salée, et forment nommément la Guadeloupe continentale. La Grande-Terre est formée d'un plateau calcaire d'origine corallienne présentant peu de relief avec des mornes (collines) peu élevés (altitude maximale de 200m). La Basse-Terre, volcanique, présente un relief contrasté dominé par la Soufrière (1 467 m, volcan actif). L'île est recouverte en son centre par une forêt tropicale humide classée Parc National depuis 1989.

Les ressources en eau sont très inégalement réparties dans l'espace : la Grande-Terre est dépourvue de cours d'eau. L'eau potable est acheminée via des canalisations depuis la Basse-Terre qui compte une cinquantaine de cours d'eau permanents.

I. 2. 1. 2. Le climat

L'archipel guadeloupéen bénéficie d'un climat tropical humide avec une température moyenne annuelle de 26°C (normale 1971-2000) avec des maxima autour de 30°C. Les écarts thermiques nycthéméraux et saisonniers restent faibles (moins de 8 degrés).

Le climat est marqué par l'alternance d'une saison sèche, le carême, de janvier à mai, et d'une saison humide, l'hivernage, de juin à décembre. La pluviométrie varie en moyenne dans un rapport de 1 à 4 entre le mois le plus sec et le mois le plus humide.



Figure 3. Carte de l'archipel de la Guadeloupe
(Source : www.madelia.info)

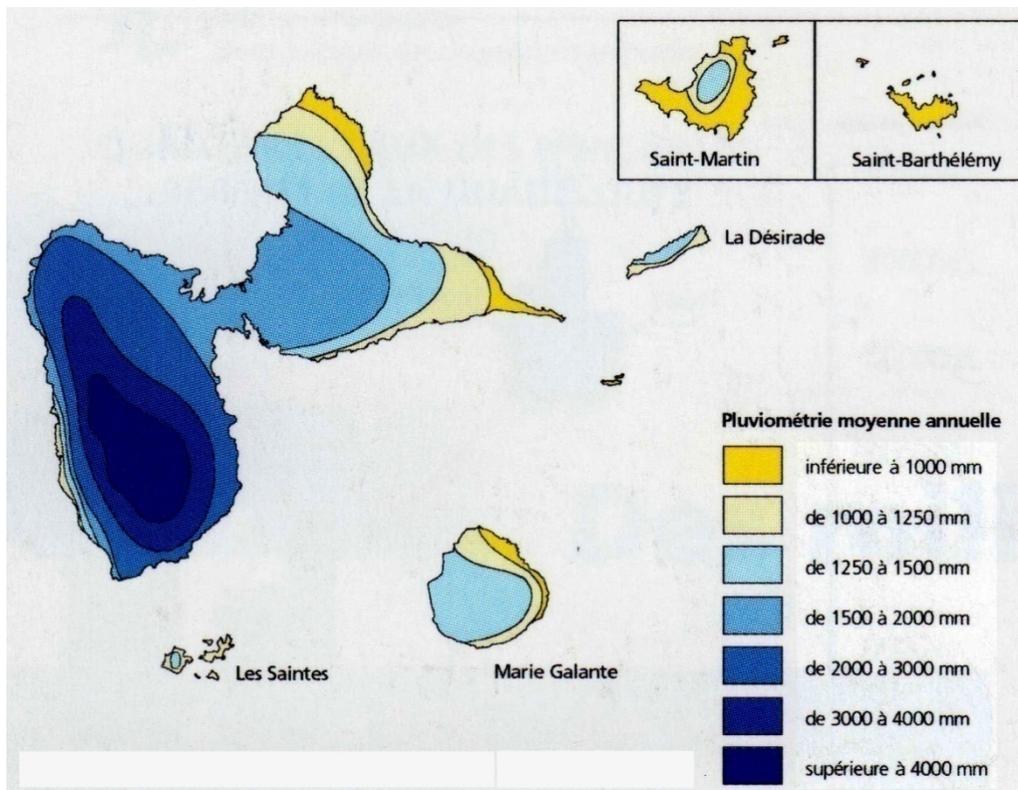


Figure 4. Carte des isohyètes annuelles
(source : Comité de bassin de la Guadeloupe)

Le climat est marqué par l'alternance d'une saison sèche, le carême, de janvier à mai, et d'une saison humide, l'hivernage, de juin à décembre. La pluviométrie varie en moyenne dans un rapport de 1 à 4 entre le mois le plus sec et le mois le plus humide.

La Guadeloupe s'interpose dans les alizés, vents toujours humides circulants d'est en ouest entraînant une répartition spatiale très contrastée de la pluviométrie (**Figure 4**). Ainsi, la Grande-Terre, au relief assez plat, reçoit à peine plus d'eau que l'océan alentour (1 à 1,7 m/an en moyenne). En revanche, la Basse-Terre présente une variabilité plus importante par l'effet orographique dit de Foehn lié au relief élevé : de 1 m/an en moyenne à Vieux-Habitants à 10 m/an en moyenne au sommet de la Soufrière. La Côte-au-Vent (côte Est de la Basse-Terre exposée au vent) est plus arrosée que la Côte-sous-le-Vent (côte Ouest protégée des alizés). Il n'y a pas d'effet de continentalité du fait de l'exiguïté du territoire et par conséquent, l'évapotranspiration ne dépasse pas 1,8 m/an.

L'archipel est exposé au risque cyclonique (tempêtes et ouragans). La période cyclonique s'étend de juin à novembre avec une période critique en septembre.

1.2.1.3. Les sols

L'origine géologique de l'archipel de la Guadeloupe est un volcanisme de subduction, explosif et de composition plus souvent andésitique que basaltique. Il est en fait à cheval sur deux arcs insulaires d'âge différent. L'arc interne des Petites Antilles, purement volcanique, comprend les îles de la Basse-Terre et des Saintes, avec le volcan de la Soufrière toujours actif. L'arc externe (le plus âgé) à soubassement volcanique recouvert d'une formation calcaire d'origine madréporique datant du plio-pléistocène, comprend les îles de la Grande-Terre, de Marie-Galante et de la Désirade.

La roche mère des sols est toujours andésitique ou basaltique (même sur les plateaux calcaires de la Grande-Terre) et ses minéraux sont tous altérables (Cabidoche, 2001). Le type minéral "argileux" prédominant dépend de la pluviométrie et de l'âge des sols : plus la pluviométrie est élevée, plus la silice et les bases sont évacuées lors de l'altération, plus les "argiles" qui se forment sont pauvres en silice et plus les sols sont acides. C'est ainsi que l'on trouve à la Guadeloupe des sols riches en minéraux secondaires, de propriétés très différentes selon leurs natures, sous la dépendance de la pluviométrie et de l'âge des sols, conformément au schéma suivant (Cabidoche, 2001) :

	Sols jeunes ($10^3 - 10^4$ ans) Minéraux primaires sableux	Sols anciens ($10^5 - 10^6$ ans) Plus de minéral primaire
Pluviométrie < ETP (1,3 à 1,5 m/an)	Sol vertique à <i>smectite</i>	Vertisol à <i>smectite</i>
ETP < Pluviométrie < 2 ETP	Sol brun à <i>halloysite</i>	Sol fersiallitique ou ferrisol à <i>smectite</i> et <i>halloysite</i>
Pluviométrie > 2 ETP	Andosol à <i>allophane</i>	Sol ferrallitique à <i>halloysite</i> et oxydes de Fe et Al

De façon simplifiée, la Guadeloupe présente 7 types de sols différents (**Figure 6**).

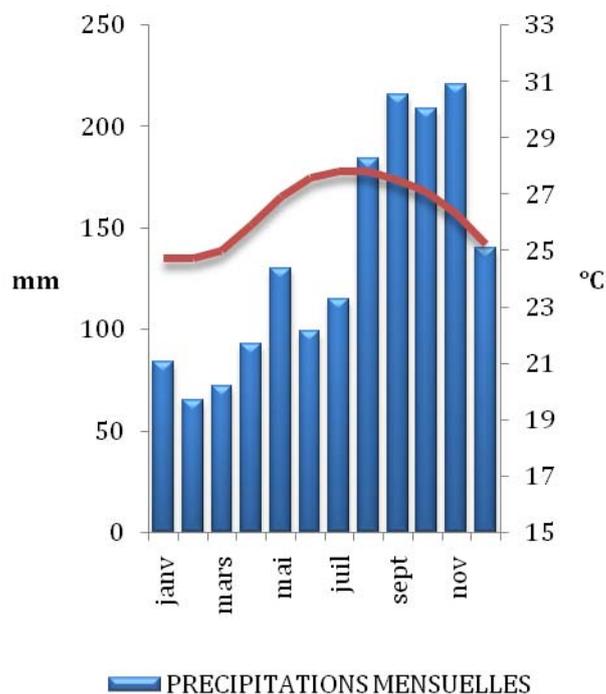


Figure 5. Normales de températures et de précipitations (1971-2000) au Raizet
(source : Météo-France)

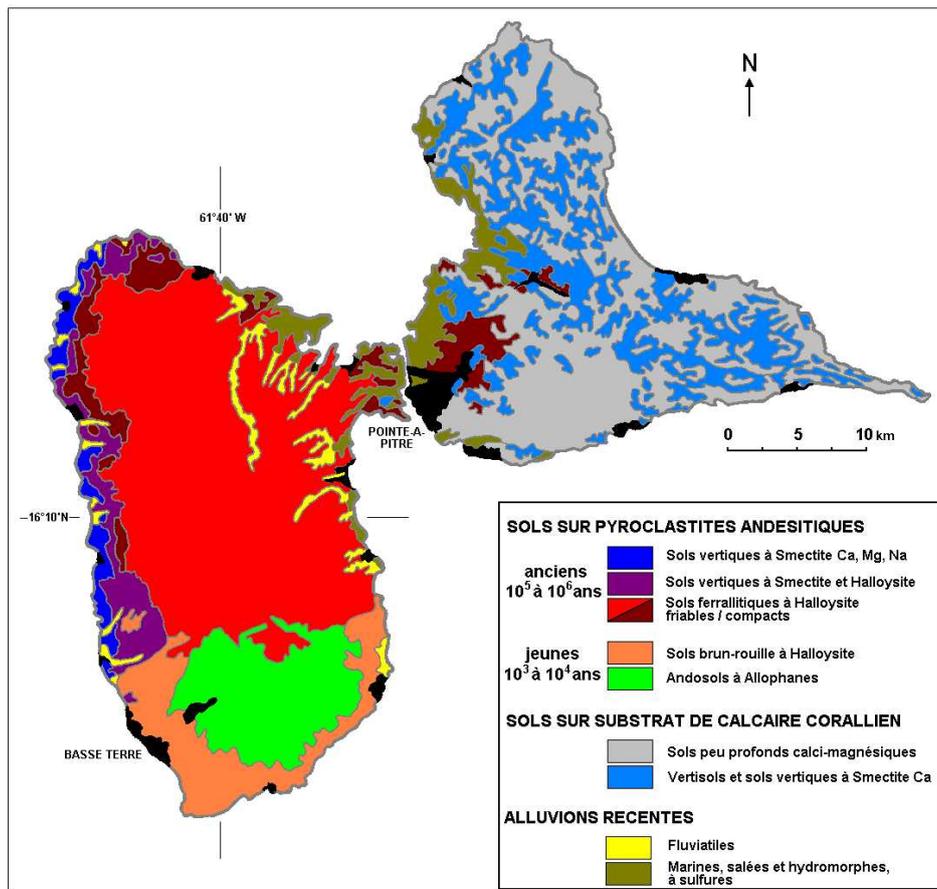


Figure 7. Répartition des types de sol de la Guadeloupe
(Source : INRA)

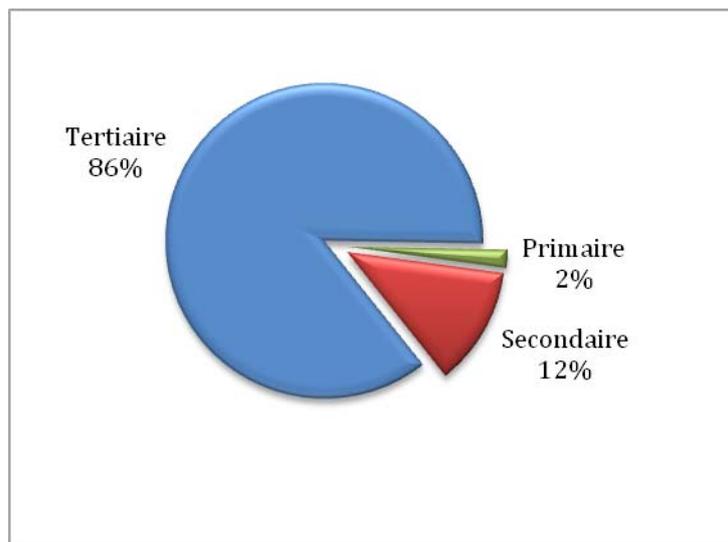


Figure 6. Répartition de l'emploi salarié par secteur en 2007
(source : IEDOM, 2008)

I. 2. 1. 4. L'économie

L'archipel guadeloupéen comptait environ 451 000 habitants au 1^{er} janvier 2007 (enquêtes de recensement révisées de l'INSEE). C'est une population assez jeune : 31,5% de la population à moins de 20 ans. En 2007, la croissance du PIB (Produit Intérieur Brut) de la Guadeloupe a été estimée à 2,6% (INSEE *in* IEDOM, 2008). Le PIB de l'île s'élève alors à 7 877 millions d'euros en 2007 soit un PIB par habitant de 17 466 € (un peu plus de la moitié de celui de la métropole, 30 140 €/habitant). Le taux de chômage en Guadeloupe est élevé. En 2007, au sens du BIT (Bureau International du Travail) ce taux s'élevait à 22,7%. Il est particulièrement élevé chez les jeunes de moins de 24 ans (55,3% contre 22,2% en métropole en 2007). L'économie est fortement tertiaisée puisque ce secteur représente 86% des emplois salariés en 2007. L'agriculture ne représente plus que 2% (**Figure 7**).

La Guadeloupe est très dépendante de l'extérieur puisque sa balance commerciale est déficitaire de 2,07 milliards d'euros en 2007. Les importations s'établissent en 2007 à 2,19 milliards d'euros, et la France hexagonale reste le premier fournisseur (55%) suivi de l'Union Européenne (14%), les Départements Français d'Amérique (7,6%), la Caraïbe (6,4%) et l'Asie (6,2%). Les exportations beaucoup plus faibles ne représentent en valeur que 125,1 millions d'euros en 2007. La France hexagonale, là encore est le client privilégié (70,6%) puis la Martinique (14,1%), l'Union Européenne (5,5%), la Guyane (3,8%), les Etats-Unis (2,7%) et la Caraïbe (1,8%). La faible part des pays de la Caraïbe s'explique par des barrières à l'entrée de ces pays et du renchérissement des produits guadeloupéens dans la zone dollar (IEDOM, 2008).

Les produits de l'agriculture et des industries agroalimentaires représentent 68,4% des exportations en valeur en 2007, témoignant de l'importance de ces deux filières dans les recettes de l'île (**Figure 8**). En tête de liste le sucre (74 mille tonnes en 2007) puis le rhum (soit 4,8 millions de litres à l'export). Les sorties de ces deux filières sont en progression par rapport à 2006 ce qui a permis au secteur agroalimentaire de se positionner comme le premier exportateur de l'île. La banane représente 14% des exportations en valeur et le melon 4% en 2007. Ces chiffres sont en régression par rapport à 2006.

I. 2. 1. 5. L'agriculture

Durant les 25 dernières années, la SAU (Surface Agricole Utilisée) n'a cessé de diminuer au profit de l'extension des zones urbanisées (Agreste, 2009). La SAU du département s'élève en 2007 à 43 565 ha (soit un quart de la surface totale de la Guadeloupe) et celle des exploitations à 34 794 ha.

Le nombre d'exploitations est également en baisse, il diminue en moyenne chaque année de 475 exploitations depuis 2000 (Agreste, 2009). En 2007, la Guadeloupe comptait 8762 exploitations agricoles dont 1 801 professionnelles. La taille moyenne des exploitations est en augmentation et s'élève à 4 ha en 2007.

L'agriculture guadeloupéenne est principalement tournée vers les productions végétales puisqu'elles représentent 82% de la production totale en valeur (**Tableau 1**). Les principales productions végétales sont la canne à sucre, les légumes et la banane.

I. 2. 1. 6. La banane

La banane est donc un pilier de l'économie agricole de la Guadeloupe. La filière bananière emploie une nombreuse main d'œuvre (3 500 emplois) pendant toute l'année. Son importance tient aussi aux externalités territoriales que procure cette production, en particulier par le maintien des lignes maritimes assurant le fret retour des exportations de bananes. En effet, les exportations de bananes représentent 80% du trafic en volumes des compagnies maritimes sur les Antilles. En deçà

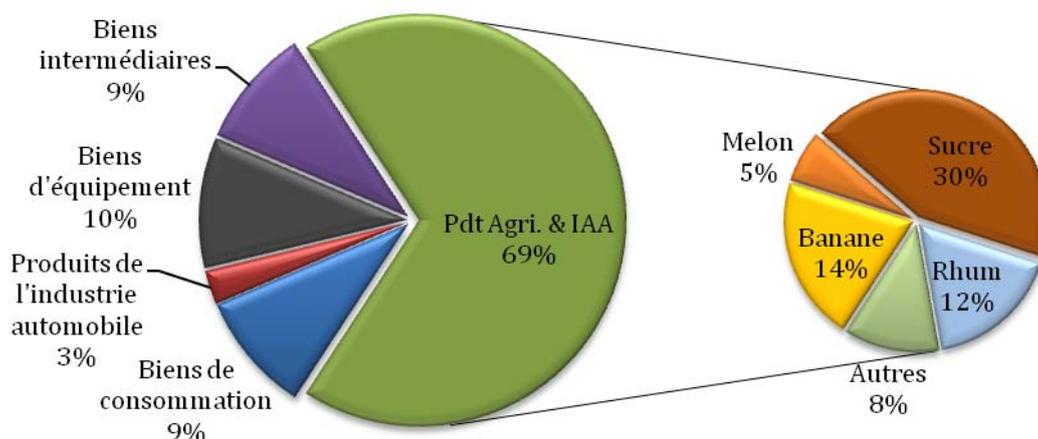


Figure 8. Répartition des exportations en valeur en 2007

(source : IEDOM, 2008)

millions d'euros courants	2007	Part du total
Production Végétale dont	218,02	82%
Légumes dont	50,08	19%
Tubercules	14,90	6%
Légumes frais	35,13	13%
Fruits dont	76,74	29%
Banane	47,21	18%
Ananas, Fruit de la Passion	7,95	3%
Melon	7,96	3%
Agrumes	6,38	2%
Plantes industrielles dont	55,99	21%
Canne	53,85	20%
Fleurs et plantes	32,34	12%
Production Animale	47,41	18%
Bétail dont	36,36	14%
Gros bovins	22,64	9%
Porcins	8,66	3%
Caprins	3,49	1%
Volailles	6,16	2%
Œufs	3,73	1%
Total production agricole	265,43	100%

Tableau 1. Production de l'agriculture en millions d'euros courants (y. c. subventions)

(Source : Agreste, 2007)

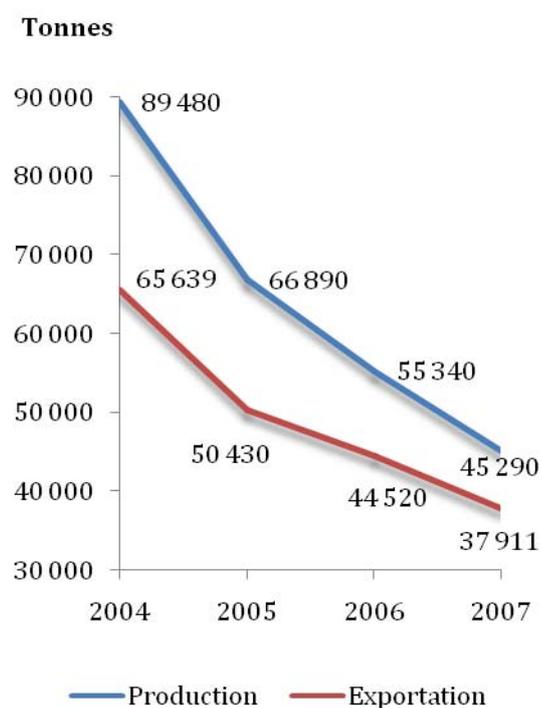


Figure 9. Evolution du tonnage de bananes produites et exportées

(source : IEDOM, 2008)

d'une production de totale de 150 000 tonnes, les lignes maritimes pourraient être supprimées faute de rentabilité (IEDOM, 2008).

La culture de la banane en Guadeloupe est une culture d'exportation, 80% de la production est destinée à l'export. Sur la période 2004 – 2007 la production de bananes diminue (**Figure 9**). Cette chute de la production s'explique largement par l'accroissement des difficultés financières des exploitations consécutivement aux dysfonctionnements de compensation malgré la mise en place par l'Etat de différents prêts de trésorerie. La chute observée en 2007 est essentiellement liée au passage du cyclone DEAN qui a détruit une partie de la production du sud de la Basse-Terre.

I. 2. 1. 7. L'organisation de la filière

Depuis 2006, les producteurs sont organisés en un seul groupement, la SICA Les Producteurs de Guadeloupe (SICA LPG) qui représente 220 planteurs. Le rôle de la SICA LPG est d'accompagner les producteurs sur les aspects techniques, agronomiques, économiques et sur les questions sociales. Elle met à disposition des planteurs une centrale d'achat des intrants et organise la collecte et l'exportation des bananes.

Les groupements de producteurs de Guadeloupe (SICA LPG) et de Martinique (SICA Banalliance et Banamart) sont regroupés dans l'Union des groupements de producteurs de bananes (UGPBAN). L'UGPBAN commercialise la totalité de la production des deux îles et est chargée d'en faire la promotion et de défendre les producteurs auprès des pouvoirs publics et sur un marché devenu très concurrentiel.

La SARL Servirpoban assure le contrôle de la cercosporiose en organisant les traitements par avion et hélicoptères. Le transport maritime est assuré par la société CGM-CMA.

Le CIRAD-FLHOR est le principal organisme de recherche intervenant auprès de la filière banane. Les principaux objectifs sont de (i) orienter les systèmes de production vers des systèmes alternatifs durables, (ii) élargir la gamme de variétés performantes à forte valeur ajoutée, visant une production non polluante.

L'Office de Développement de l'Economie Agricole des Départements d'Outre-Mer (ODEADOM) intervient sur l'ensemble des filières agricoles du département et constitue l'organisme payeur des aides de la filière banane.

I. 2. 1. 8. Localisation des bananeraies

La culture de la banane se situe principalement sur l'île de la Basse-Terre compte tenu des besoins hydriques de la plante (1 800 mm/an) et s'étage entre 0 et 800 mètres d'altitude. Les exploitations sont concentrées au sud/sud-est de la Basse-Terre dans une zone communément appelée le croissant bananier (**Figure 10**). L'étude réalisée dans ce rapport se limitera à cette zone de production qui représentait 90% des planteurs en 2006.

La surface consacrée à la culture de la banane a considérablement diminué, passant de 4 600 ha en 2000 à 2 260 ha en 2007. Elle représente 5% de la SAU en 2007. Le nombre d'exploitations consacrées à cette culture a également chuté. Elles étaient 1 023 en 1993 pour ne représenter que 208 en 2007. La structure de production se caractérise par une prédominance de petites exploitations familiales (moins de 10 ha) qui représentent un peu plus de 80% des planteurs (Plan Banane Durable, 2008).

I. 2. 1. 9. Ecophysiologie du bananier

Le bananier (**Figure 11**) est une herbacée monocotylédone de la famille des *Musaceae* d'une taille comprise entre 2 et 8 mètres. La plante a un mode de reproduction asexué. Le cycle de culture est en moyenne de 10 mois, un régime est produit entre 7 et 14 mois. L'optimum de température se

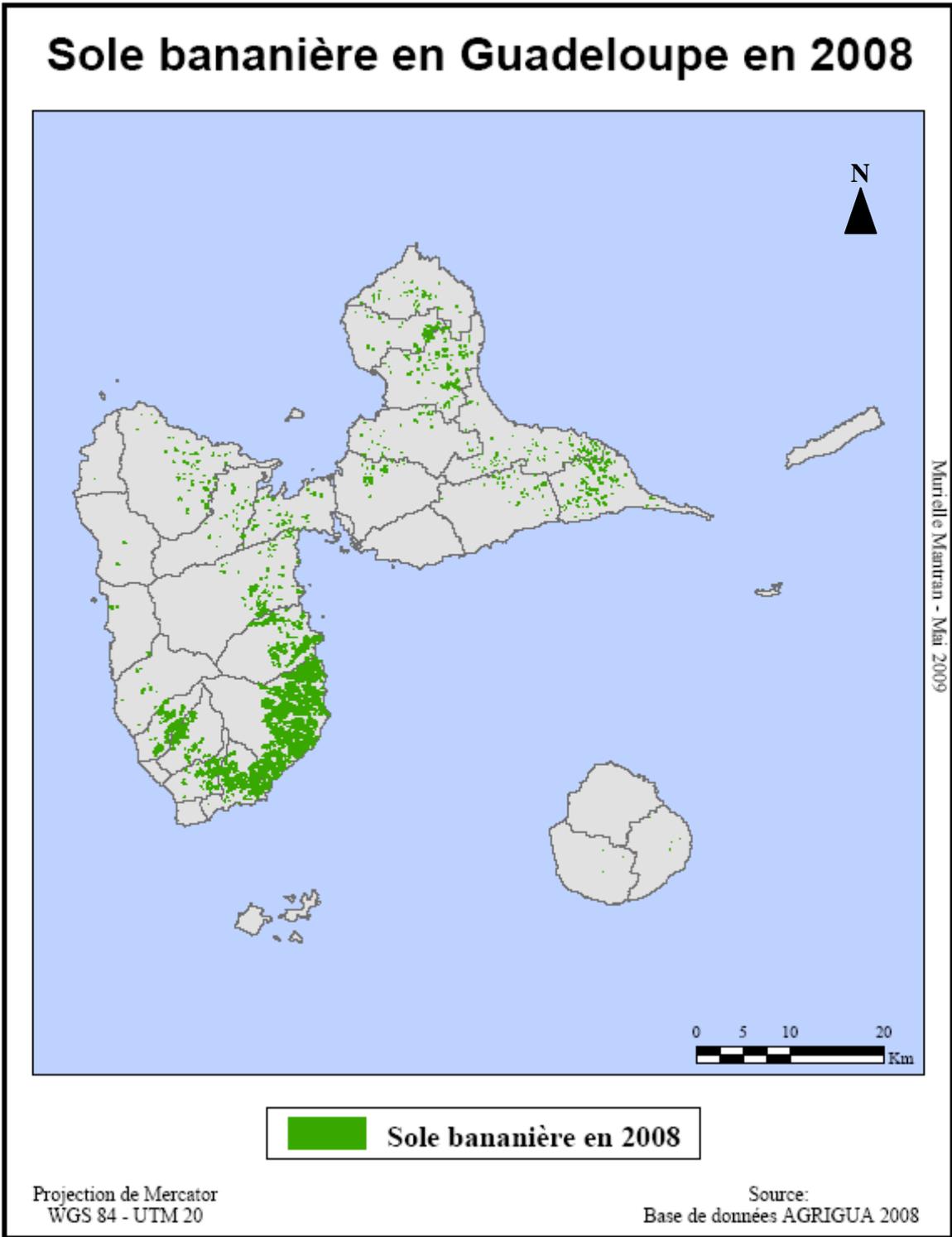


Figure 10. Sole bananière de la Guadeloupe en 2008
(Source : INRA)

situé autour de 28°C et le zéro de végétation se situe à 14°C. Le bananier exige une durée d'insolation comprise entre 1 900 et 2 400 heures, un apport hydrique entre 1 600 et 2 000 mm/an et un pH allant de 5,5 à 7,5. Mais le bananier supporte des valeurs de pH comprises entre 3,5 et 8. Le plant mère génère régulièrement des rejets faisant du bananier une culture pérenne.

Les principaux agresseurs du bananier en Guadeloupe sont :

- le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus*
- le nématode endophytoparasitaire *Radopholus similis*
- la cercosporiose, maladie fongique causé par *Mycosphaerella musicola* et *Mycosphaerella fijiensis*

I. 2. 1. 10. La conduite de la bananeraie

La culture de bananes peut être menée de façon pérenne ou semi-pérenne. Dans ce dernier cas de figure, la plantation s'effectue tous les 4 à 6 ans.

Les bananiers sont plantés avec ou sans travail du sol mécanisé (sous-solage et machine à bêcher) avec des rejets issus d'autres parcelles ou avec des vitro-plants. La densité de plantation varie entre 1 600 et 2 000 pieds/ha.

Les soins apportés au bananier sont :

- l'œilletonnage : choisir le meilleur rejet afin de garantir le renouvellement du pied mère ;
- l'effeuillage : éliminer régulièrement les feuilles sénescentes ou malades ;
- le haubanage : soutenir le bananier à l'aide de cordages pour prévenir de la verse.

Les soins apportés au régime sont le :

- dégagement : élimination des feuilles en contact avec le régime, ablation des fausses mains (les dernières du régime) ;
- marquage chaque semaine des régimes au stade floraison en vue de la planification d'une date de récolte optimale (somme des températures) ;
- gainage : pose d'une gaine plastique autour du régime pour la protection contre certains insectes (thrips principalement).

La récolte s'effectue manuellement suivant le rythme de production de la bananeraie. Le plant mère est sectionné après prélèvement du régime. Les régimes sont acheminés au hangar où ils sont suspendus et dépattés. Les pattes (ou mains) sont trempées dans un bain fongicide (traitement contre l'antracnose et précipitation du latex). Les bananes sont triées et conditionnées dans des cartons de 18,5 kg. Les rendements moyens sont plutôt faibles : 18 à 20 t/ha (potentiel de 50 à 60 t/ha) (Dulcire et Cattan, 2002). Les opérations de récolte et post-récolte représentent 30 à 50% du travail total, l'exigence en main d'œuvre est de l'ordre de 0,6 UTA/ha. Lorsque la bananeraie est replantée, la destruction des plants se fait par injection de glyphosate dans le pseudo-tronc ou mécaniquement. L'enherbement est contrôlé chimique (majoritairement), manuellement ou mécaniquement. Les principaux traitements phytosanitaires sont des fongicides par voie aérienne (avions et hélicoptères), insecticides et des nématicides. En amendements, le manuel du planteur préconise un apport de calcaire de 1 t/ha avant la plantation et 250 g/pieds deux fois par an à partir du second cycle. Les préconisations en matière de fertilisation de ce même manuel, sont particulièrement élevées. Elles sont raisonnées en fonction des pertes éventuelles par lessivage : un apport tous les 250 ou 200 mm de précipitations en fonction du type de sol. Ainsi, un apport de 400 kg N/ha/cycle est conseillé. Ce sont ces niveaux de fertilisation, parfois supérieurs, qui sont pratiqués. D'après les travaux de Thieuleux (2006) ces niveaux représentent plus du double des besoins de la culture en premier cycle (150 kg/ha) et plus de 8 fois ceux des cycles suivants (50 kg/ha).

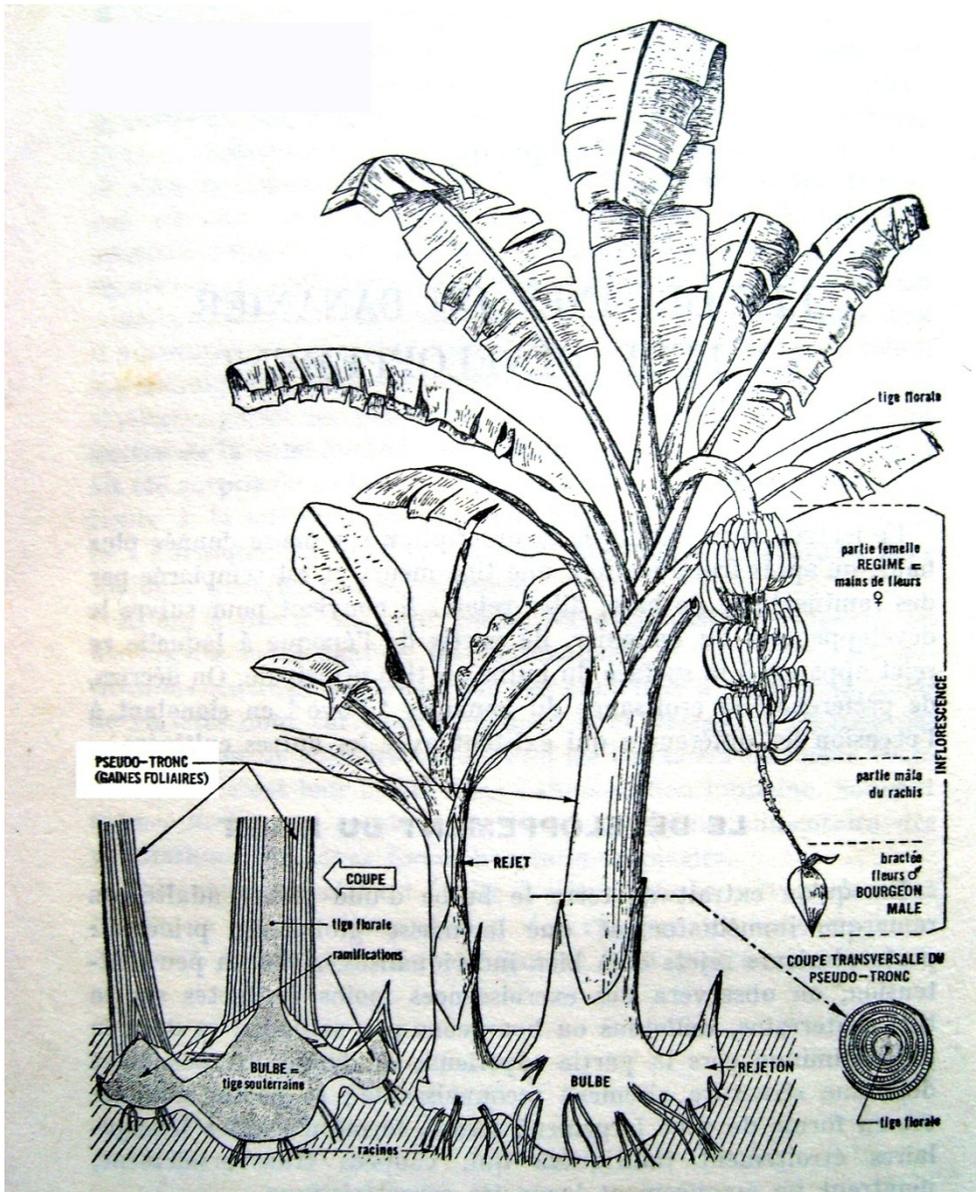


Figure 11. Vue schématique d'un bananier à la fructification et de ses rejets
(source : Champion, 1963)

La banane est une culture exigeante en main d'œuvre. A part le travail du sol, les opérations culturales s'effectuent dans la majorité des cas, manuellement (apports engrais et nématicides au pied des bananiers, désherbage au pulvérisateur à dos, récolte). La culture de la banane est donc source d'emplois.

I. 2. 2. Les travaux antérieurs et programmes en cours

Face à la multiplication des pressions économiques, sociales et environnementales s'exerçant sur la production de banane aux Antilles, la durabilité des exploitations bananières est de plus en plus remise en cause. L'unité de recherche agropédoclimatique de l'INRA (UR APC) a donc développé, en partenariat avec le CIRAD et les organisations de producteurs, un programme de conception de systèmes de culture de bananiers innovants. Ce programme vise à développer et promouvoir des systèmes de culture performants économiquement et utilisant moins d'intrants (en particulier les pesticides).

Le principal objectif du projet est de concevoir des systèmes de culture de bananiers innovants plus durables en modélisant leur adoption.

Les premiers travaux développés dans le cadre de ce programme ont permis de développer une méthode générique en quatre étapes basée sur la combinaison d'outils de modélisation agronomique et économique (**Figure 12**) (Blazy, 2008) :

- Modélisation de la diversité des exploitations à travers une approche typologique et systémique des pratiques, et prototypage de systèmes innovants plus durables répondant à différentes combinaisons d'objectifs et de contraintes correspondant à chaque type d'exploitation,
- Utilisation d'un modèle de culture pour simuler le fonctionnement biophysique des innovations et évaluer leurs performances agronomiques et environnementales dans les différents types d'exploitation,
- Evaluation des impacts de l'adoption des innovations sur le fonctionnement et les performances techniques et économiques des types d'exploitation à l'aide d'un modèle bioéconomique d'exploitation dynamique,
- Evaluation à l'aide d'un modèle économétrique des préférences des exploitants agricoles confrontés à des propositions de systèmes innovants virtuels et analyse du déterminisme de ces choix d'adoption.

La méthode a été appliquée à la conception et à l'évaluation *ex ante* de prototypes de systèmes de cultures bananiers aux Antilles françaises.

Ainsi, 6 types de système de culture très contrastés avec des problèmes de durabilité se déclinant différemment ont pu être identifiés. Les principales caractéristiques de chacun de ces types sont présentées dans le **Tableau 2**. La typologie a été établie au moyen d'enquêtes sur un échantillon représentant 36% de la population des planteurs (Blazy, 2008). 18 prototypes de systèmes innovants ont été mis au point (**Tableau 3**) avec deux objectifs principaux :

- Réduction de l'utilisation des pesticides
- Recours à des procédés naturels de contrôle des ravageurs et/ou de nutrition minérale

Le premier objectif répond à la demande sociétale et vise principalement à protéger les ressources en eau de la pollution par les pesticides. Le second doit permettre la réduction des intrants chimiques et donc celle des charges, tout en maintenant ou en améliorant le rendement en bananes.

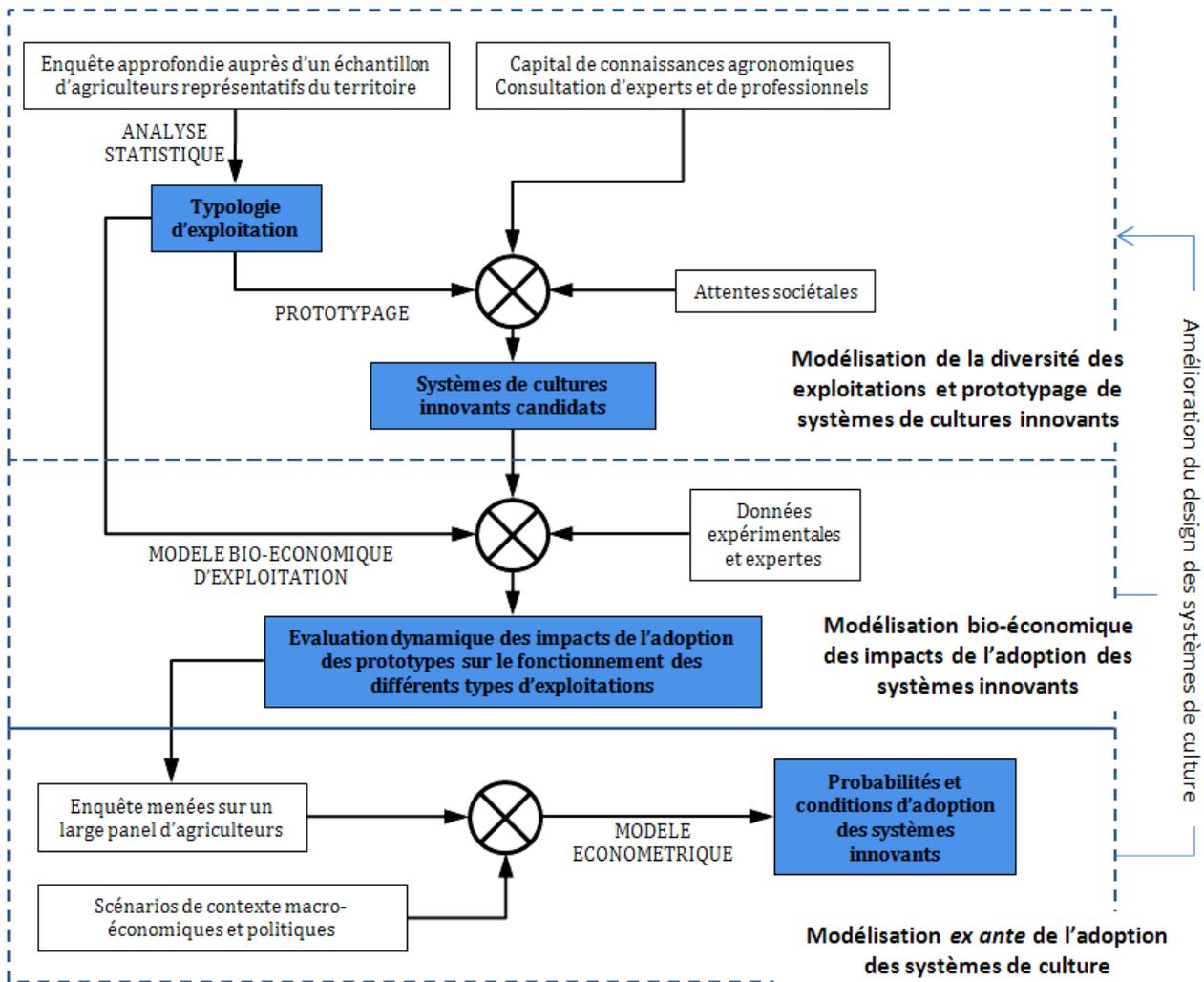


Figure 12. Cadre méthodologique pour l'évaluation *ex ante* de systèmes de culture innovants, de la conception à l'adoption

(Blazy, 2008)

Le tableau 1 en **Annexe I** synthétise les objectifs agro-écologiques visés pour chacune des innovations.

Les plantes proposées en rotation (*Crotalaria juncea*, *Brachiaria decumbens* et Ananas) et la jachère permettent d'assainir la parcelle en nématodes telluriques par la suppression des plantes hôtes. Les nématodes attaquent les racines, fragilisant le bananier qui verse. La lutte actuelle recourt à des nématicides nocifs et néfastes pour l'environnement. La jachère doit être contrôlée chimiquement car certaines espèces adventices sont des plantes hôtes pour le nématode. Le *C. juncea*, conjugue deux intérêts. Tout d'abord elle fixe l'azote (légumineuse), ensuite, elle aurait une action némato-régulatrice par la sécrétion d'exsudats racinaires.

Les cultures associées sont des cultures à implanter sur la parcelle alors que la banane est présente. Elles permettent un contrôle des adventices par effet mulch et ainsi une réduction de l'utilisation d'herbicides. Le *Canavalia ensiformis* est une légumineuse et combine trois avantages. Tout comme le *C. juncea*, cette secrèterait des toxines racinaires nématicides, effet qui a été vérifié pour deux espèces de nématodes mais pas pour le *R. similis*. Cette légumineuse a un potentiel d'apport de 800 kg N/ha/cycle (8 mois). Enfin, étant rapidement couvrante, cette plante permet un bon contrôle des adventices (effet plante de couverture). L'*Impatiens* sp. est une petite plante à fleurs rose ou violettes poussant à l'état sauvage. Elle peut servir à limiter l'érosion. On lui prête des propriétés némato-régulatrices mais ce n'est pas démontré scientifiquement.

Les nouvelles variétés proposées sont résistantes à la cercosporiose jaune (causée par *Mycosphaerella musicola*) et à la cercosporiose noire (ou Sigatoka, causée par *Mycosphaerella fijiensis*). En Guadeloupe, pour l'instant, il n'y a que la cercosporiose jaune de présente. De plus ces variétés présentent une résistance partielle aux nématodes (Quénéhervé *et al.*, 2008). Cependant, ces bananes se différencient de la Cavendish par une forme et un goût différent. Les bananiers sont de grande taille (plus haut que la Cavendish), la durée du cycle est diminuée et les fruits sont plus petits.

Ces innovations ont été expérimentées et quelques photos de prototypes de systèmes innovants sont présentées en **Annexe II**.

Le modèle de culture SIMBA (Tixier, 2004) a été utilisé pour évaluer le comportement de la culture de la banane selon les différentes innovations en prenant en compte la typologie des systèmes de culture. Un modèle de culture vise à estimer des grandeurs agronomiques ou physiologiques, parfois les impacts environnementaux et les performances économiques du système. SIMBA est un modèle qui simule les systèmes de culture à base de bananier. Il a donc été choisi pour cette raison mais aussi parce qu'il permet de prendre en compte un large panel d'opérations culturales et des cultures autres que le bananier (scénarios de rotations et de cultures associées). SIMBA simule les performances agronomiques des bananiers (rendement, population des bananiers) mais aussi l'impact sur l'environnement (azote lessivé, structure du sol, note qualitative de pollution des eaux...), et la population de nématodes dans le sol. Enfin, SIMBA simule les systèmes de culture de bananiers à l'échelle de la parcelle sur plusieurs cycles à un pas de temps hebdomadaire.

Le modèle BANAD (Blazy, 2008), est un modèle bioéconomique qui a permis de simuler l'impact des innovations sur la production, les performances économiques, la charge de travail et l'utilisation des pesticides en tenant compte de la diversité des systèmes de culture. BANAD utilise les données biophysiques en sortie du modèle SIMBA et comme ce dernier, il s'exécute sur plusieurs cycles au pas de temps hebdomadaire mais à l'échelle de l'exploitation.

Type de système de culture	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Conduite de la bananeraie	Bananeraie replantée tous les 5 à 8 ans			Bananeraie pérenne		
	Monoculture		Rotation avec canne à sucre ou jachère		Monoculture	
Surface du système (ha)	4,2	8	82	28	8	5
Altitude moyenne (m)	80	115	123	250	550	380
Pente moyenne	10%	0%	10%	10%	20%	30%
Type de sol	Sols bruns	Sol ferrallitique	Sols bruns	Andosol	Andosol	Andosol
Surface irrigable	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Surface mécanisable	100%	100%	100%	75%	0%	0%
Type de destruction de la bananeraie	Mécanique	Mécanique	Mécanique	Chimique	-	-
Type de travail du sol	Mécanisé	Mécanisé	Mécanisé	Mécanisé	Manuel	Manuel
Nombre de traitements herbicides par an	4,8	6	5	6	0	4
Nombre de traitements nématocides par an	1	1,5	2,5	1	0	1
Rendement moyen (t/ha/an)	21,4	22,5	45,2	38,5	17,3	18,6
Pourcentage de main d'œuvre familiale	74%	42%	2%	9%	37%	70%

Tableau 2. Typologie des systèmes de culture de la région

L'évaluation des systèmes innovants à l'aide de cette combinaison de modèles a montré que les performances des prototypes peuvent varier considérablement d'un type d'exploitation à un autre, et que certains systèmes très prometteurs sur le plan agronomique et environnemental à la parcelle, peuvent cependant poser des problèmes de trésorerie et de charge de travail à l'échelle de l'exploitation. Cette évaluation aura porté principalement sur l'impact de l'adoption des différents systèmes candidats à l'innovation sur la production, la marge dégagée, la charge de travail et le niveau d'utilisation des pesticides. Certains aspects de la durabilité n'ont pas été abordés comme l'acceptabilité sociale ou la préservation de la biodiversité.

Plusieurs questions demeurent. Comment aboutir à une évaluation globale et synthétique de la durabilité prenant en compte les différentes dimensions de la durabilité ? Quels critères choisir ? Quelle est la durabilité des systèmes actuels ? La durabilité est-elle améliorée par l'adoption d'un système innovant ? Les impacts des innovations sur la durabilité des exploitations sont ils variables selon le type d'exploitation ? Existe-t-il une innovation permettant d'améliorer la durabilité de tous les types ?

La présente étude a pour but de répondre à de telles questions.

I. 2. 3. Objectifs du stage

Nos objectifs de travail sont doubles :

- Construire ou adapter une méthode d'évaluation de la durabilité des systèmes innovants en tenant compte de la diversité des systèmes de culture. Cette méthode doit traiter des trois dimensions de la durabilité et doit pouvoir aboutir à une note globale agrégeant des critères de nature différente.
- Classer les innovations selon leur durabilité pour chaque type : quelle innovation pour quel type de système de culture bananier.

Dans le premier chapitre nous présenterons un état de l'art sur les méthodes et outils d'évaluation de la durabilité de systèmes agricoles. Le second chapitre a pour but de présenter la méthode de travail utilisée. Les résultats obtenus sont présentés dans le troisième chapitre, puis sont discutés dans le chapitre quatre en proposant des recommandations d'action et des pistes d'amélioration de la méthode.

Type d'innovation	N°	Description
Suspension de l'utilisation de pesticides	1	Arrêt des traitements nématicides
	2	Arrêt des traitements herbicides (passage à du désherbage manuel ou mécanique)
	3	Arrêt des traitements nématicides et herbicides (passage à du désherbage manuel ou mécanique)
Adoption de rotation	4	Introduction <i>Crotalaria juncea</i> (8 mois)
	5	Introduction jachère spontanée contrôlée chimiquement (12 mois)
	6	Introduction Ananas (24 mois)
Adoption de systèmes intégrés	7	Système intégré 1 (plaine) : rotation avec <i>Brachiaria decumbens</i> (12 mois) + SCVV + culture associée <i>B. decumbens</i>
	8	Système intégré 2 (montagne) : rotation avec jachère contrôlée chimiquement (12 mois) + culture associée <i>Impatiens</i> sp.
	9	Système biologique : rotation avec <i>C. juncea</i> + culture associée <i>Canavalia ensiformis</i> + apport fertilisation organique
Adoption de cultures associées	10	Culture associée <i>C. ensiformis</i>
	11	Culture associée <i>B. decumbens</i>
	12	Culture associée <i>Impatiens</i> sp.
Raisonnement des apports	13	Traitement nématicides fonction d'un monitoring de nématodes
	14	Traitement herbicide fonction d'un seuil de couverture du sol en adventices
	15	Apports de fertilisants chimiques en fonction des besoins
Adoption de nouvelles variétés	16	Variété 91X
	17	Variété 91Y
	18	Variété 91Y en système biologique rotation avec <i>C. juncea</i> + culture associée <i>Canavalia ensiformis</i> + apport fertilisation organique

Tableau 3. Description des différentes innovations
(SCVV : Semis sous Couvert Végétal Vivant)

II. Etat de l'art sur les méthodes et outils pour l'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles.

L'évaluation est une étape importante dans toute démarche d'amélioration. Elle permet de vérifier l'atteinte des objectifs en vue d'une optimisation du système.

Elle permet d'estimer ou de mesurer des effets a priori d'actions (évaluation *ex ante*) ; d'identifier les causes (diagnostic) ; de suivre l'évolution d'une situation (évaluation *in itinere*) ; d'effectuer le bilan d'actions (évaluation *ex post*) dans un but de décision (piloter, proposer des mesures à prendre, proposer des améliorations) ou de communication.

L'évaluation se fait par le biais d'indicateurs. Les indicateurs sont des variables qui fournissent des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès. Ils servent de repères pour prendre une décision (Gras *et al.* 1989 in Bockstaller et Girardin, 2003). Il caractérise un état relatif par rapport à une valeur de référence (Girardin *et al.*, 1999). Une distinction est faite entre un indicateur basique résultant d'une mesure directe ou d'une estimation (modèles, calculs) et un indicateur composite obtenu par agrégation de plusieurs variables ou d'indicateurs simples.

Nous avons vu en introduction le caractère multidimensionnel (économique, social et environnemental) et multidisciplinaire de la durabilité. L'évaluation de la durabilité nécessite donc une approche holistique (Ikerd, 1993 ; Andreoli *et al.*, 1999 ; Andreoli et Tellarini, 2000 ; Espinosa *et al.*, 2008). Le modèle d'évaluation doit intégrer les connaissances de plusieurs disciplines (Ewert *et al.*, 2009), des objectifs différents et gérer les aspects conflictuels de ces objectifs (Andreoli et Tellarini, 2000 ; Sadok *et al.*, 2009). L'évaluation de la durabilité peut être vue comme un problème type de la prise de décision et menée par des méthodes d'aide à la décision multicritères (Munda *et al.*, 1994 ; Sadok *et al.*, 2008).

L'aide à la décision multicritères (MCDA, Multi-Criteria Decision-Aid) est un domaine de recherche qui vise à développer des outils permettant de choisir la solution idéale ou optimale, de trier ou classer des alternatives en intégrant plusieurs objectifs le plus souvent conflictuels (Proctor et Qureshi, 2005, Sadok *et al.*, 2008). La méthodologie de l'aide à la décision multicritères est la suivante (Munda *et al.*, 1994 ; Hayashi, 1998 ; van der Werf et Lopez-Ridaura, 2008 ; Sadok *et al.*, 2008) :

- définition et structuration du problème
- choix d'une série d'indicateurs
- identification du système de préférence du décideur
- choix de la méthode d'agrégation

La première étape consiste à définir le système à étudier (limites, échelle spatio-temporelle) puis à modéliser le problème et à déterminer l'objectif global de la méthode. Le modèle doit être le plus proche possible de la réalité (Munda *et al.*, 1994). La méthode peut permettre de déterminer une série d'alternatives ou de sélectionner la meilleure alternative et une distinction est alors faite entre les méthodes dites continues (distribution continue des alternatives) et celles discrètes (*ibid.*).

La série d'indicateurs doit représenter l'ensemble du problème. Leur nombre doit être suffisamment important pour représenter les aspects essentiels du système. Un nombre trop élevé peut rendre la méthode inapplicable, induire des redondances et une confusion (Munda *et al.*, 1994, Briquel *et al.*, 2001). L'information donnée par l'indicateur peut être qualitative ou quantitative (Munda *et al.*, 1994 ; Andreoli *et al.*, 1999 ; Sadok *et al.*, 2008). Dans le cas d'indicateurs « quantitatifs », les valeurs des indicateurs peuvent être issues de mesures directes, d'un calcul simple ou des résultats de la simulation d'un modèle complexe (Bockstaller *et al.*, 2008).

Selon le décideur, des composantes du problème peuvent avoir une importance fondamentale et d'autres plus faible. Le décideur peut alors pondérer les composantes¹ et/ou les indicateurs d'après sa propre logique, l'avis d'experts ou des modèles mathématiques (Nardo *et al.*, 2005). Cette étape implique la subjectivité de la méthode (Munda *et al.*, 1994 ; Nardo *et al.*, 2005) phénomène inévitable mais souhaitable (Munda *et al.*, 1994). En effet, sans subjectivité ou créativité, un modèle devient trop rigide incitant à « forcer » la réalité pour qu'elle s'adapte au modèle (Munda *et al.*, 1994).

Les composantes élémentaires du problème doivent être agrégées afin d'avoir une vision globale et de réduire la quantité et la complexité de l'information (Castoldi et Bechini, 2009). Le choix de la méthode d'agrégation est une étape clé, puisque les résultats obtenus dépendent principalement de ce choix (Munda *et al.*, 1994). Il existe une diversité de méthodes d'agrégation (Munda *et al.*, 1994 ; Nardo *et al.*, 2005) telles que les méthodes additive, multiplicative, géométrique, de surclassement ou les fonctions d'utilité. Elles se différencient selon qu'elles permettent la compensation ou non entre les composantes (Munda *et al.*, 1994 ; Bane e Costa *et al.*, 1997 ; Nardo *et al.*, 2005).

Les méthodes MCDA développées présentent une grande diversité et diffèrent selon les choix qui ont été fait à chaque étape (Munda *et al.*, 1994 ; Sadok *et al.*, 2008) :

- distribution continue ou discrète des alternatives
- information quantitative ou qualitative traitée
- méthode de détermination des préférences
- méthode d'agrégation
- degré de compensation

Le choix de la méthode d'évaluation se base sur différents critères tels que l'objectif global visé, les données disponibles, l'échelle spatio-temporelle considérée, la représentation du problème. L'échelle est un aspect important de la méthode puisque les indicateurs peuvent être déterminés à des échelles de temps et d'espace différents (Rigby et Cáceres, 2001 ; Van Cauwenbergh *et al.*, 2007 ; Castoldi et Bechini, 2009). En outre, la méthode choisie afin d'évaluer la durabilité doit :

- intégrer les objectifs des différentes dimensions de la durabilité ainsi que le caractère parfois antagonique de ces derniers;
- traiter des données qualitatives et quantitatives (Munda *et al.*, 1994 ; Sadok *et al.*, 2008) ;
- ne pas autoriser de compensation entre les dimensions (économique, sociale et environnementale) ;
- être conçue en collaboration avec l'ensemble des acteurs concernés – choix de la série indicateurs, des valeurs de référence de ceux-ci, de la pondération des composantes (Bockstaller *et al.*, 2008).

Cependant, l'obtention de données quantitatives étant coûteuse, le plus souvent l'information disponible est qualitative (Andreoli *et al.*, 1999). Aussi, l'utilisation de données quantitatives pose des problèmes tels que la gestion d'unités de mesure différentes. L'information quantitative peut alors être traduite sur une échelle ordinale ou linguistique, en définissant le pire des cas, le meilleur et la distribution des valeurs à l'aide de la valeur de référence.

Le choix d'une méthode par rapport à une autre doit être fait avec beaucoup d'attention. En effet, les méthodes MCDA sont subjectives (Munda *et al.*, 1994, Bockstaller *et al.*, 2008, Sadok *et al.*, 2009) et dépendante de leur contexte d'élaboration sur plusieurs points :

¹ Une composante (ou thème) correspond à une sous-dimension du problème mais aussi à l'agrégation d'indicateurs simples ou composites.

Méthode	IDEA	MOTIFS	ADAMA	MASC
Type de production	Cultures, Elevage	Elevage laitier	Cultures, Elevage	Cultures
Echelle spatiale	Exploitation	Exploitation	Exploitation	Parcelle
Impact peu ou pas traité		Conditions de travail	Social, Qualité de l'eau, Qualité de l'air, Conditions de travail, Paysage	Paysage
Activité peu ou pas traitée	Bâtiments	Bâtiments	Energies renouvelables, Fertilisation potassique	Bâtiments, Fertilisation potassique, Traitement des déchets organiques et non organiques
Type des données requises	Pratiques agricoles, Caractéristiques du site et de ces éléments	Gestions des déchets organiques et non organiques	Pratiques agricoles, Caractéristiques du site et de ces éléments	Pratiques agricoles, Caractéristiques du site et de ces éléments
Type d'indicateur	Indicateurs de pratiques	Indicateurs de pratiques, de risque et d'impact	Indicateurs de risque et de pratiques	Indicateurs de risque, d'impact et de pratiques
Méthode d'agrégation	Somme	Somme pondérée	Somme	Règles du type « Si... Alors... » dans un arbre de décision
Utilisateurs potentiels	Agriculteurs, Etudiants, Techniciens, Enseignants	Agriculteurs, Techniciens	Agriculteurs, Techniciens	Chercheurs
Source	BRIQUEL et al., 2001 Zahm et al., 2004	Meul et al., 2008	Häni et al., 2003	Sadok et al., 2009

Tableau 4. Comparaison de 4 méthodes d'évaluation de la durabilité

- la représentation de la durabilité, correspondant à la vision des concepteurs
- la pondération des composantes
- la définition de l'échelle des indicateurs et des valeurs de référence
- la méthode d'agrégation

Ces différents points auront donc un impact fort sur les résultats (Munda *et al.*, 1994 ; Nardo *et al.*, 2005). Une bonne méthode devra donc clairement afficher ses choix méthodologiques (van der Werf et Lopez-Ridaura, 2008). Aussi, il est recommandé d'effectuer une analyse de sensibilité de la méthode avant l'interprétation des résultats (Sadok *et al.*, 2008).

De nombreux outils et méthodes d'évaluation de la durabilité de l'agriculture ont été développés selon différentes méthodes d'aide à la décision multicritères (Sadok *et al.*, 2008 ; Bockstaller *et al.*, 2009). Cependant, beaucoup de ces outils se focalisent sur une ou deux des dimensions de la durabilité (en général économique et environnementale) (von Wirén-Lehr, 2001 in Meul *et al.*, 2008).

Les caractéristiques de quelques unes de ces méthodes sont présentées dans le **Tableau 4**.

La méthode IDEA est surtout un outil pédagogique dans une démarche d'auto-évaluation ou d'animation de groupe. Elle concerne aussi bien la production végétale que l'élevage et la polyculture-élevage.

La méthode MOTIFS est outil de diagnostic pour permettre aux agriculteurs d'augmenter la durabilité de leur exploitation. A ce jour, elle a été mise en œuvre pour les exploitations laitières flamandes.

La méthode ADAMA évalue la durabilité d'une exploitation. Elle a été testée sur des types d'exploitations très différentes aux Brésil, en Chine, en Suisse et au Canada. Nous sommes encore en présence d'un outil de diagnostic.

La méthode MASC permet d'évaluer *ex ante* la durabilité à l'échelle du système de culture, échelle peu traitée (Bockstaller *et al.*, 2008, Sadok *et al.*, 2009) par ce type de méthode.

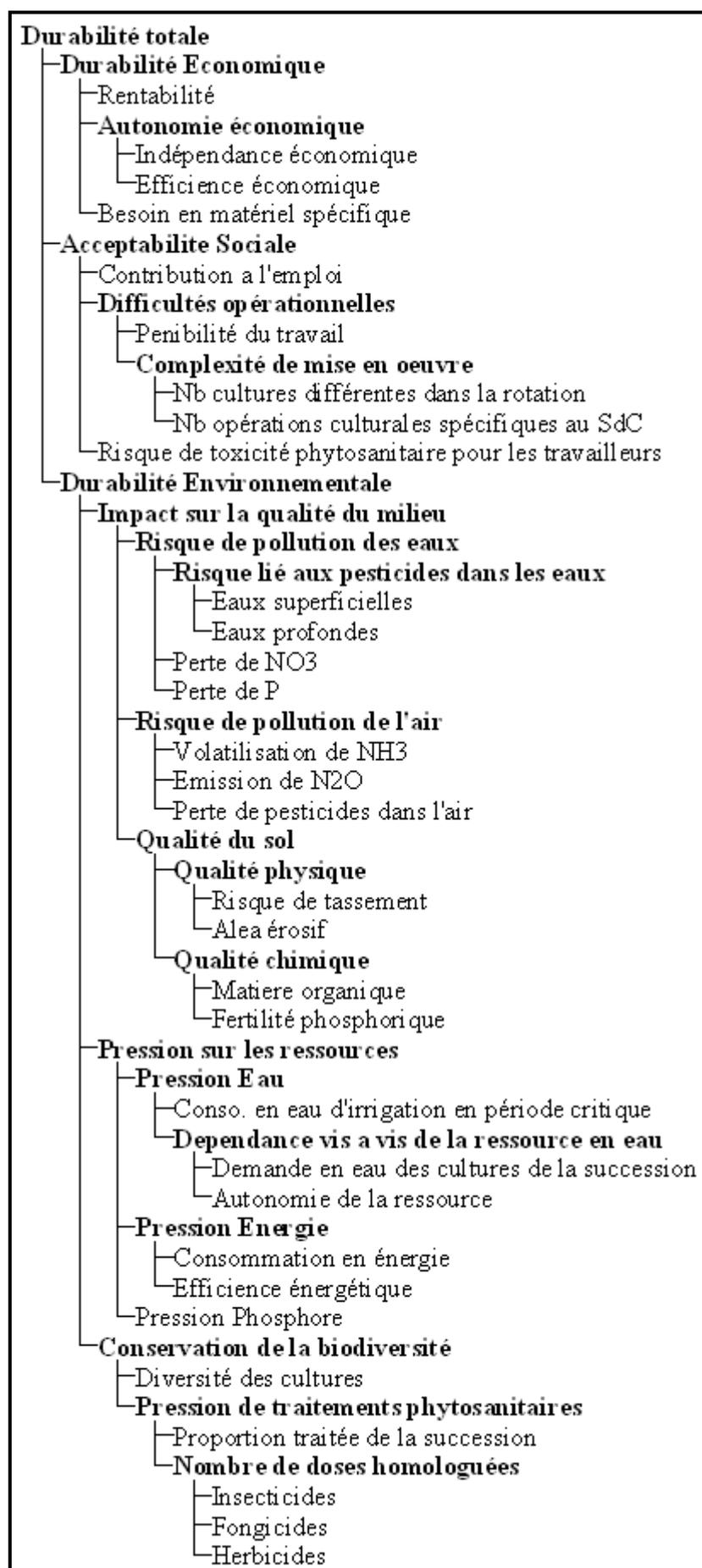


Figure 13. Arbre hiérarchique de MASC

(Les critères composites sont en gras ; SdC : système de culture)

III. Méthode de travail

Compte tenu du temps et des moyens disponibles, en préférence d'une conception *de novo* d'une méthode d'évaluation, notre choix s'est orienté vers l'adaptation d'une méthode existante : le modèle MASC (pour Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems).

Nous exposerons tout d'abord les raisons du choix de cette méthode, suivi de sa description. Puis, l'adaptation au contexte bananier de la Guadeloupe sera détaillée. Enfin nous expliquerons comment la typologie des systèmes de culture a été prise en compte.

III. 1. Choix du modèle MASC

Comme nous l'avons souligné précédemment dans les objectifs, la méthode doit permettre une évaluation de la durabilité globale de systèmes de culture innovants. La méthode MASC a été donc choisie en adéquation avec notre objectif et l'échelle d'étude, le système de culture. Cette méthode permet d'évaluer *ex ante* la durabilité à l'échelle du système de culture, échelle peu ou pas traitée par les autres méthodes. Les dimensions économiques, environnementales et sociales de la durabilité sont prises en compte. La dimension sociale n'est généralement pas traitée ou faiblement par la plupart des méthodes existantes. Elle présente également une forte adaptabilité par sa structure et son support informatique (logiciel DEXi, Bohanec, 2008). Enfin, nous disposons de la majorité des données requises pour son implémentation.

III. 2. Description de MASC

Le modèle a été mis au point dans le cadre du projet français Discotech (DISpositif innovants pour la Conception et l'évaluation des systèmes TECHniques).

L'objectif de MASC est d'évaluer *a priori* des systèmes de culture conformes à un cahier des charges. L'outil DEXi (Jereb *et al.*, 2003 in Bohanec *et al.*, 2004), fondé sur l'approche MCDA, a été utilisé pour mettre en œuvre MASC.

La durabilité est conceptualisée sous la forme d'un arbre hiérarchique composé de 31 critères basiques agrégés en 21 critères composites (**Figure 13**).

Les critères sont estimés soit quantitativement (14 des 31 critères) par des modèles ou des calculs simples, soit qualitativement (17) par la littérature, l'avis d'experts ou par la méthode INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2007). Les valeurs sont ensuite définies sur une échelle linguistique (qualitative, exemple : *Faible/Moyen/Elevé*). C'est à l'utilisateur de définir les valeurs de référence selon son propre jugement, l'avis d'experts, la littérature et le contexte de l'évaluation.

L'agrégation des critères se fait à l'aide de règles de décision du type « *Si... Alors...* ». Exemple : si la qualité physique est *stable* et si la qualité chimique est *favorable*, la qualité globale du sol évolue dans un sens *favorable*. Ce type d'agrégation permet la pondération des critères. La définition des règles de décision a été laissée ouverte à l'utilisateur pour la plupart des critères et dépend :

- de sa vision personnelle
- du contexte et des normes
- des contraintes du cahier des charges des systèmes de cultures considérés

En fonction de la définition des règles de décision, le logiciel DEXi est capable d'évaluer les poids attribués en pourcentage.

Une importance identique est donnée à chacune des dimensions (durabilité économique, acceptabilité sociale et durabilité environnementale) mais cette pondération peut être modifiée avec un seuil minimum pour chacune des dimensions.

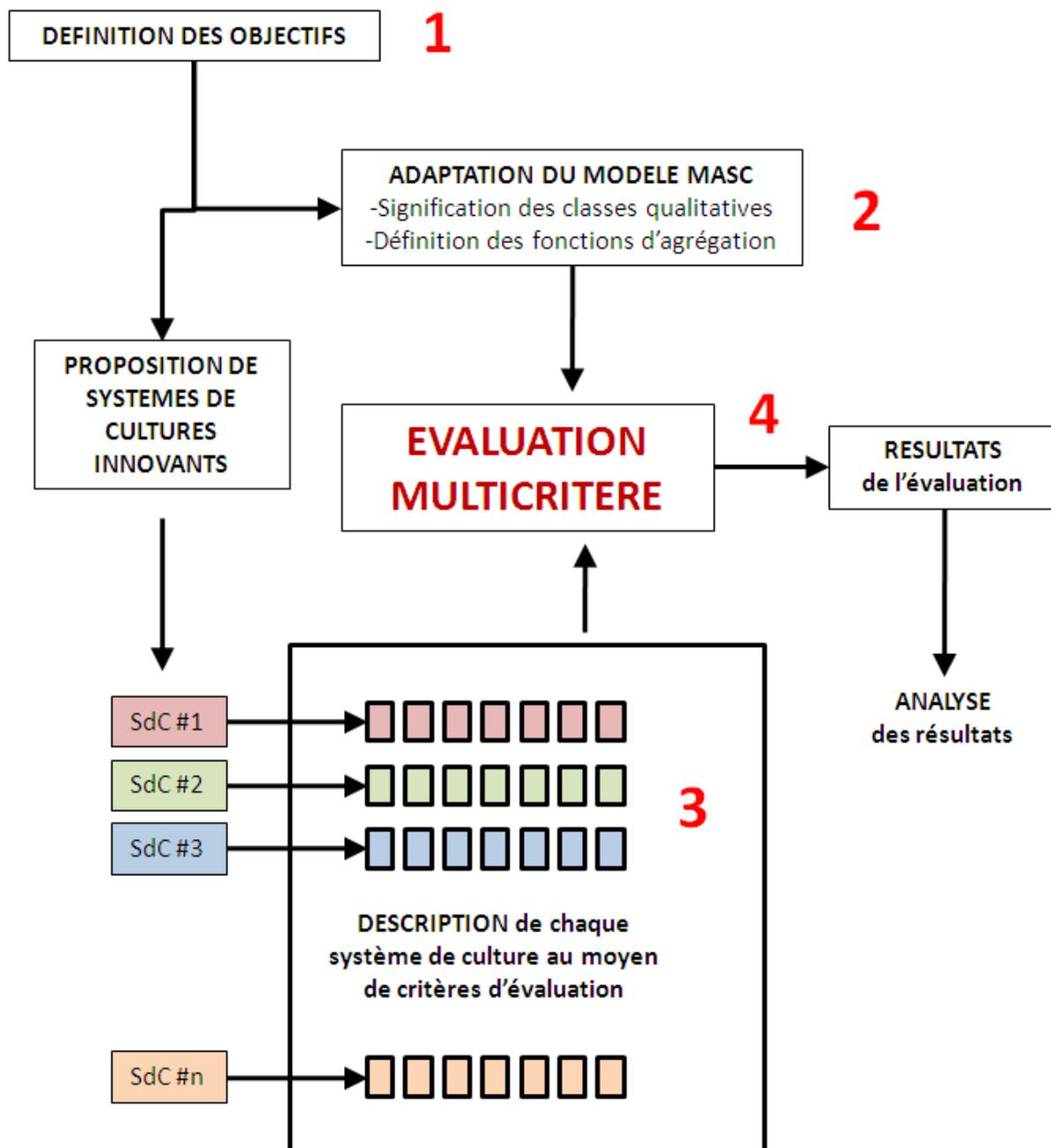


Figure 14. Démarche d'évaluation de systèmes de culture avec l'aide de MASC

Enfin, le modèle renvoie l'évaluation du système de culture sous la forme de notes qualitatives. Le logiciel DEXi permet une visualisation graphique des résultats. Trois types de graphique sont proposés :

- des histogrammes représentant, pour un ou plusieurs systèmes de culture, la valeur d'un critère
- des graphiques à deux dimensions représentant, pour un ou plusieurs systèmes de culture, la valeur de deux critères
- des radars représentant, pour un seul système de culture, les valeurs de trois à six critères.

Les différentes étapes dans une démarche d'évaluation de systèmes de culture avec l'aide de MASC sont présentées dans la **Figure 14**.

La première étape, définition des objectifs, permet d'orienter l'évaluation de systèmes de culture en fonction des objectifs recherchés : réduction de l'utilisation de pesticides, meilleure performances économiques, évaluation de la durabilité globale dans notre cas. Pour que l'évaluation soit pertinente le modèle MASC doit être adapté au contexte de la culture de la banane en Guadeloupe. L'adaptation se fait à plusieurs niveaux :

- la structure de l'arbre, c'est-à-dire la représentation de la durabilité ;
- les nœuds de l'arbre, c'est-à-dire les modalités d'agrégations de plusieurs critères en un critère d'ordre supérieur (choix des pondérations) ;
- la base de l'arbre, c'est-à-dire le mode de calcul ou d'évaluation des critères basiques de MASC.

La troisième étape consiste à caractériser chaque système de culture étudié à l'aide d'un ensemble de critères de performance. La dernière étape est réalisée après la mise en œuvre de MASC. Elle consiste à prendre connaissance des sorties et à analyser les résultats obtenus pour évaluer comment les systèmes de culture étudiés permettent de répondre globalement aux objectifs exprimés au départ.

III. 3. Adaptation de MASC

III. 3. 1. L'arborescence

L'arborescence correspond à la conceptualisation de la durabilité, c'est-à-dire, la représentation que l'on se fait de la durabilité. Elle doit donc être discutée : prise en compte des impacts que l'on cherche à évaluer, pertinence des critères.

La structure de l'arborescence a donc été discutée avec des experts de l'UR APC au cours d'entrevues collectives et individuelles. La pertinence de chaque critère a été jugée et plusieurs remarques ont été faites.

- Dans notre contexte (Sud-Est de la Basse-Terre) la volatilisation d'azote (émissions de NH_3) et la dénitrification (émission de N_2O) sont supposées négligeables (Sierra *et al.*, 2001 ; Thieuleux, 2006).
- La banane est une culture peu exigeante en phosphore
- Il n'y a pas de problèmes de fertilité phosphorique des sols (Cabidoche, com. pers.)
- Les pertes en phosphore sont négligeables (stockage par le sol) (Cabidoche, com. pers.)
- Le modèle SIMBA propose des indicateurs capables d'évaluer
 - de fertilité des sols R-fert
 - de risque d'érosion R-ero
 - de risque de pollution des eaux par les pesticides R-pest

Il a été choisi de garder l'impact des émissions de NH_3 et de N_2O dans l'arborescence si par la suite la méthode devait être étendue à la Grande-Terre (autre situation pédologique) où ces

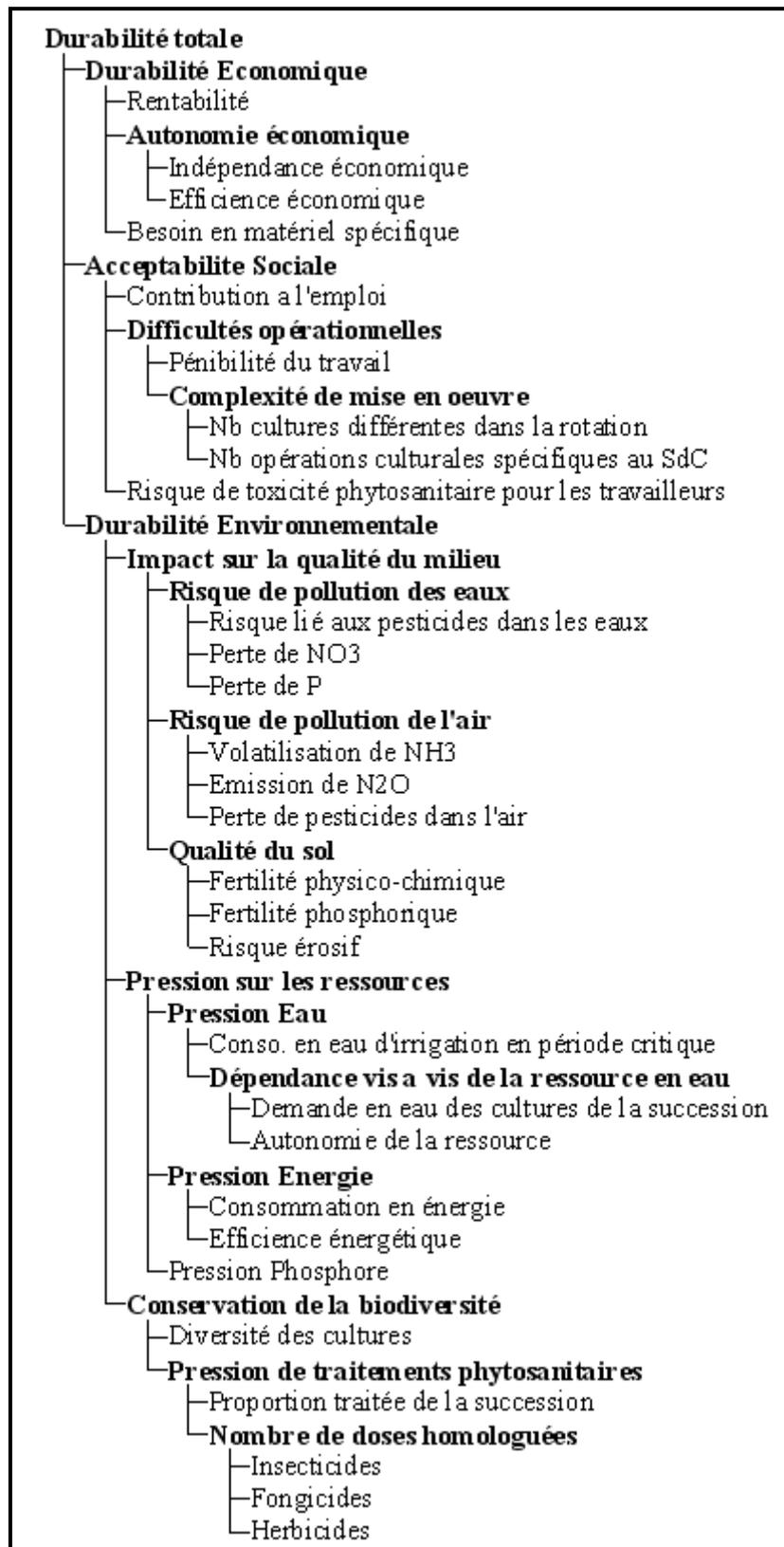


Figure 15. Arborescence de MASC-Banane
 (Les critères composites sont en gras ; SdC : système de culture)

émissions ne sont plus négligeables. Les critères liés au phosphore ont été conservés. Aussi, le critère "Risque lié aux pesticides dans les eaux" qui est un critère composite agrégeant les critères basiques "Eaux superficielles" et "Eaux profondes" devient un critère basique par suppression des deux critères le composant. L'indicateur R-pest intègre le risque de pollution des eaux superficielles et profondes (Tixier *et al.*, 2007). Le critère composite "Qualité du sol" qui correspond à l'agrégation de deux critères composites ("Qualité chimique" et "Qualité physique") dans la version livrée de MASC. Ce critère correspond pour notre étude à l'agrégation des critères basiques "Fertilité phosphorique", "Fertilité physico-chimique" et "Risque érosif". Les deux derniers critères cités sont des critères évalués par SIMBA. Le critère "Fertilité physico-chimique" correspond à l'indicateur R-fert qui prend en compte le risque de tassement, la minéralisation de la matière organique et la capacité du milieu à développer des parasites telluriques (uniquement *R. similis*). Le critère "Risque érosif" correspond à l'indicateur R-ero. La nouvelle arborescence a été de nouveau discutée pour être acceptée.

L'arborescence de MASC utilisée dans le cadre de notre étude est présentée en **Figure 15**. L'arbre hiérarchique se compose au final de 29 critères basiques agrégés en 18 critères composites. Par la suite pour noter la différence, nous appellerons "MASC" la version initiale livrée, et "MASC-Banane" la version adaptée au contexte de notre étude.

III. 3. 2. L'agrégation des critères dans l'arborescence

Lors de l'agrégation de plusieurs critères en un critère de niveau supérieur, des poids sont affectés afin de considérer l'importance relative accordée aux différents critères sous-jacents. L'importance relative des impacts est définie en fonction des priorités et de la vision stratégique de l'utilisateur et du contexte.

Le logiciel DEXi permet la définition des pondérations de deux manières : par l'intermédiaire de règles de décision renseignées par les utilisateurs, ou en entrant directement dans le logiciel les valeurs numériques des poids estimées. Dans MASC, les fonctions d'agrégations ont déjà été pré-remplies par les concepteurs : certaines agrégations, indépendantes du contexte local, ont été fixées. Dans le cas contraire, les concepteurs ont proposé des fonctions d'agrégation, en spécifiant une valeur de poids minimale pour chaque critère dans l'agrégation. Pour ces fonctions, il est donc nécessaire de redéfinir les règles d'agrégation.

Les pondérations des critères ont été là aussi discutées une à une avec des experts de l'UR APC. Pour deux critères ("durabilité totale" et "pression sur les ressources"), les valeurs des poids préenregistrées correspondaient à notre vision globale et ont été conservées telles quelles. A contrario, nous avons défini *de novo* les fonctions d'agrégation de 10 critères en respectant les restrictions des pondérations présentées dans la documentation de MASC (INRA, 2008) :

- Durabilité environnementale
- Pression énergie
- Qualité du sol
- Risque de pollution de l'air
- Risque de pollution des eaux
- Impact sur la qualité du milieu
- Acceptabilité sociale
- Difficultés opérationnelles
- Durabilité économique
- Autonomie économique

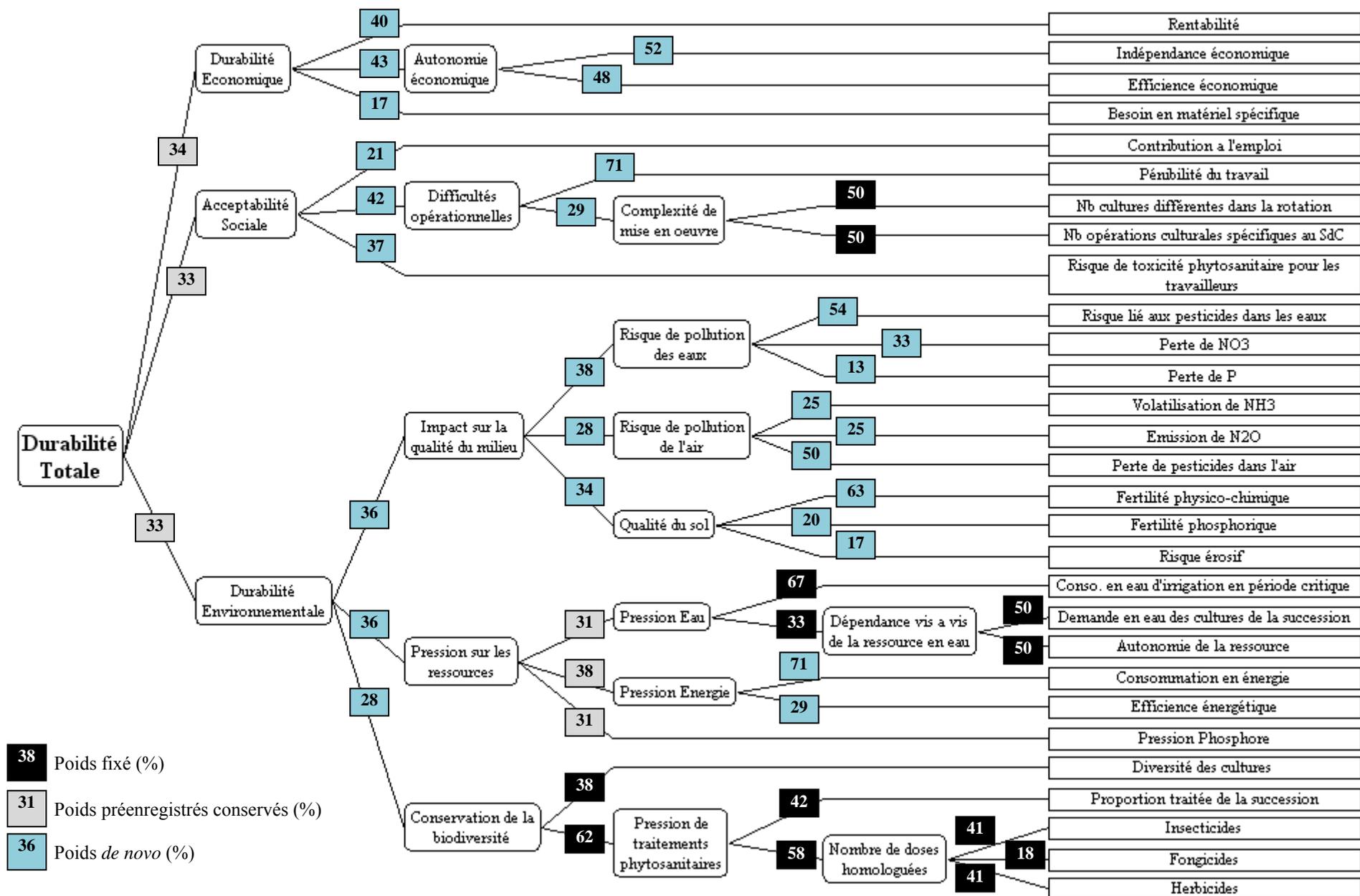


Figure 16. Arbre hiérarchique de MASC-Banane et poids choisis pour l'étude en Guadeloupe

Deux méthodes ont été employées pour la définition des pondérations :

- La méthode utilisant exclusivement les règles de décision, c'est-à-dire la méthode où chaque règle est définie par l'utilisateur. Cette méthode permet d'éviter la compensation d'une mauvaise note d'un critère par la bonne note d'un autre. Exemple : Si la **consommation en énergie** est **élevée** et l'**efficacité énergétique** est **élevée**, alors la **pression énergie** est **élevée**. Ici une consommation en énergie élevée n'est pas compensée par une efficacité énergétique élevée. Ensuite il est possible de visualiser les poids obtenus.
- La méthode mixte : entrée de valeurs numériques pour les poids puis révision des règles de décision. En entrant des valeurs numériques de poids, DEXi renseigne automatiquement les règles de décision, mais cette méthode donne lieu à une agrégation compensatoire. Il est donc nécessaire de vérifier les règles proposées et d'en modifier certaines par souci de non compensation.

Les poids choisis pour l'agrégation des critères sont présentés en **Figure 16**.

Ainsi, il nous apparaissait que pour l'autonomie économique, une bonne efficacité économique ne pourrait pas compenser une faible indépendance économique. Ces deux critères ont donc respectivement un poids de 48% et 52%.

Pour la durabilité économique, une importance moindre a été donnée au critère besoin en matériel spécifique (17%) qui n'est pas important pour l'ensemble des innovations à évaluer. Des pondérations proches ont été attribuées aux critères "rentabilité" et "autonomie économique" mais en affectant une plus grande importance à ce dernier critère car la culture de la banane est fortement subventionnée. Dans l'hypothèse d'une réduction ou d'une suppression de ces subventions, ce critère nous paraissait plus important.

De nombreuses opérations culturales en bananeraie sont effectuées manuellement et les conditions climatiques tropicales font que la culture de la banane est considérée comme pénible par rapport à d'autres cultures. Le critère pénibilité du travail a donc été affecté d'un poids important (71%) pour l'agrégation du critère "difficultés opérationnelles".

Ainsi, pour l'agrégation du critère "acceptabilité sociale", les "difficultés opérationnelles" ont un poids plus élevée (42%). Les traitements étant effectués le plus souvent manuellement, les travailleurs sont amenés à manipuler directement les produits phytosanitaires. Le "risque de toxicité phytosanitaire" pour les travailleurs a donc été jugé lui aussi important (poids de 37%).

Les différents sols de notre contexte d'étude ayant un pH acide, ils stockent les ions PO_3^{2-} et les pertes de phosphates sont négligeables. De plus, la banane étant une culture peu exigeante, les apports de phosphore ne sont pas élevés. Une faible importance a donc été attribuée au critère "perte de phosphore". Les niveaux de fertilisation azotée sont élevés (jusqu'à 400 kg N/ha/an), ce qui laisse supposer que d'importantes quantités d'azote sont lessivées. Pourtant, l'impact sur la concentration en nitrates des eaux est faible. Les nitrates seraient dilués par des lames d'eau importantes (effet chasse d'eau, entre 2,5 et 4,6 m/an de précipitations) et la capacité d'échange anionique des sols acides notamment des andosols interviendrait pour réguler les fuites de nitrates (Cabidoche *et al.*, 2002). Une importance moyenne a donc été attribuée au critère perte de nitrates (33%). Compte tenu de l'objectif des innovations (réductions de l'utilisation des pesticides) et de la préoccupation sociétale (culture de la banane coupable pour la pollution des eaux par la chlordécone), le critère risque de pollution lié aux pesticides dans l'eau est apparu très important (54%). Une attention a été portée afin que de faibles pertes de nitrates et de phosphore ne compensent pas un risque lié aux pesticides dans l'eau élevé ou même moyen.

Comme il a été dit précédemment, les émissions d'ammoniac et d'oxyde nitreux sont négligeables dans la zone d'étude. Une importance identique leur a été attribuée (25%). En

	Critères basiques	Unités	Performances	Performances MASC-Banane
Durabilité Economique	• Rentabilité	€/ha/an	2 715	très faible
	• Indépendance économique	%	-130,97	faible
	• Efficience économique	%	15,21	moyenne
	• Besoin en matériel spécifique	Note qualitative	Faible	<i>faible</i>
Acceptabilité Sociale	• Contribution à l'emploi	UTH/ha/an	0,48	faible
	• Pénibilité du travail	Note qualitative	Moyenne	moyenne
	• Nombre de cultures différentes dans la rotation	Cultures	0,2	moyen
	• Nombre d'opérations culturales spécifiques au SdC	Opérations/an	11	<i>faible</i>
	• Risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs	Doses/an	0	<i>nul</i>
Durabilité Environnementale	• Perte de pesticides dans les eaux	Note numérique	6	moyen
	• Perte de NO3	Note qualitative	Faible à moyen	faible à moyenne
	• Perte de P	Note qualitative	Très faible	<i>très faible</i>
	• Volatilisation de NH3	Note qualitative	Faible	<i>faible</i>
	• Emission de N2O	Note qualitative	Faible	<i>faible</i>
	• Perte de pesticides dans l'air	Note qualitative	Moyenne	moyenne
	• Fertilité physico-chimique	Note numérique	7,06	<i>favorable</i>
	• Fertilité phosphorique	Note qualitative	Acceptable	<i>acceptable</i>
	• Risque érosif	Note numérique	2,34	<i>faible</i>
	• Consommation en eau d'irrigation en période critique	mm/an	0	<i>faible</i>
	• Demande en eau des cultures de la succession	mm/an	1 794,95	moyenne
	• Autonomie de la ressource	mm/an	0	<i>élevée</i>
	• Consommation en énergie	MJ/ha/an	44 120,49	élevée
	• Efficience énergétique	Note numérique	2,12	faible
	• Pression Phosphore	Note qualitative	Moyenne	moyenne
	• Diversité des cultures	Note numérique	1	très faible
	• Proportion traitée de la succession	%	100	très élevée
	• Insecticides	Doses/an	0	<i>faible</i>
	• Fongicides	Doses/an	4,2	élevé
• Herbicides	Doses/an	4,6	élevé	

Tableau 5. Caractérisation et transformation en classe qualitatives de l'innovation 1 (suppression des traitements nématicides) chez le type 1

bananeraie, les traitements fongicides contre la cercosporiose se font par voie aérienne. Un poids majeur a donc été accordé au critère perte de pesticides dans l'air (50%).

Les sols sont riches en argiles et acides ce qui leur confère une forte stabilité structurale. Dans la fonction d'agrégation du critère qualité du sol, le risque érosif ne compte que pour 17% et la "fertilité phosphorique" pour 20%. Parce qu'il intègre plusieurs impacts (voir section III. 3. 1.), le critère "fertilité physico-chimique" dispose d'un poids élevé (63%).

Compte tenu des objectifs et du fait que les pratiques agricoles ont un impact particulièrement important sur les propriétés du sol (Cabidoche, 2001), dans la fonction d'agrégation du critère "impact sur la qualité du milieu", un poids de 38% a été accordé au critère "risque de pollution des eaux", 34% pour la "qualité du sol" et 28% pour le "risque de pollution de l'air".

Il est important que les systèmes de culture innovants soient moins consommateurs en énergie. Ainsi, pour l'agrégation du critère "pression énergie", la "consommation en énergie" a une plus grande importance (71%) que l'"efficacité énergétique" (29%).

Pour la "durabilité environnementale" nous avons choisi d'accorder une importance identique aux critères "impact sur la qualité du milieu" et "pression sur les ressources" (36%) et un poids de 28% au critère "conservation de la biodiversité".

III. 3. 3. Mode de calcul des critères

Des adaptations ont également été faites pour le mode de calcul des critères. En effet, celui-ci n'était pas adapté au contexte local, type de culture (semi-pérenne) et/ou aux innovations (prise en compte des cultures associées). Aussi, dans MASC, de nombreux critères utilisent pour leur évaluation la méthode INDIGO® qui n'est pas adaptée à notre contexte. Les modèles et les références sous-jacents de cette méthode sont spécifiques à un contexte pédoclimatique de zones tempérées.

Nous disposons déjà pour certains critères une évaluation par les modèles SIMBA ou BANAD. Pour d'autres la méthode d'estimation qualitative par expertise a été choisie ou un mode d'évaluation a été créé en s'inspirant du mode proposé.

Les différentes adaptations sont résumées en **Annexe III**. Le mode de calcul pour quelques critères est détaillé en **Annexe IV**.

III. 4. Caractérisation des systèmes de culture

Cette étape consiste à caractériser chaque système de culture par les performances de l'ensemble des critères basiques. Les valeurs de chaque critère ont donc été calculées ou estimées pour chacun des systèmes de culture. Le **Tableau 5**, colonne "Performances", présente la caractérisation de l'innovation 1 (arrêt des traitements nématicides) chez le type 1.

III. 5. Signification des classes

L'information traitée par le logiciel DEXi est de nature qualitative. Les valeurs des critères sont de nature quantitative et qualitative. Elles doivent donc être transformées en valeurs qualitatives au moyen de classes. Les échelles de classes ont entre 3 et 5 niveaux.

Pour la majorité des critères évalués quantitativement, les classes ont été définies suivant la distribution des valeurs, les avis des membres de l'équipe de travail ou en conservant celles proposées par MASC. Pour les critères évalués par les indicateurs (R-ero, R-pest et R-fert) du modèle SIMBA, les classes établies par le concepteur ont été conservées (Tixier, 2004). Les critères évalués

Paramètres	Unités	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3	TYPE 4	TYPE 5	TYPE 6
Surface	ha	4,2	8	82	28	8	5
Surface banane productive	ha	4,2	8	68,3	24	8	5
Surface irriguée	%	0	0	100	0	0	0
Durée jachère	semaines	0	0	52	52	0	0
Durée bananeraie	années	5	6	5	6	9,9	9,9
Pourcentage de tri (bananes non vendues)	%	13,5	9	8	8,5	28	11
Prix vente banane	€/kg	0,56	0,54	0,57	0,57	0,45	0,46
Rendement moyen	t/ha/an	24	21	38	36	17	24
Coût main d'œuvre	€/jour	32,56	40,70	61,12	57,26	40,82	38,19
Marge nette	€/ha/an	2 097	760	4 929	4 850	- 971	1 235

Tableau 6. Quelques paramètres spécifiques au type de système de culture dans les simulations SIMBA et BANAD et quelques résultats des simulations

par une estimation qualitative l'ont été directement sur la même échelle que celle proposée par MASC. Ces critères n'ont donc pas subi de transformation.

Le **Tableau 5**, colonne "Performances MASC-Banane", présente les performances transformées en classes qualitatives pour l'innovation 1 (arrêt des traitements nématicides) chez le type 1. La signification des classes est présentée dans le **Tableau 1** de l'**Annexe V**.

III. 6. Prise en compte d'une typologie de systèmes de culture représentative de la diversité régionale.

Dans l'évaluation, la diversité des systèmes de culture a été prise en compte afin d'être plus proche de la réalité. En effet, l'évaluation menée en considérant un système de culture théorique, typique ou moyen n'est pas appropriée pour évaluer les impacts différents que l'adoption d'innovations peut avoir sur les performances et le fonctionnement d'exploitations (Blazy, 2008) qui présentent une diversité d'itinéraires techniques et de conditions pédoclimatiques et socio-économiques. Dans l'évaluation de la durabilité à l'aide de MASC-banane, la diversité des systèmes de culture a été prise compte à deux niveaux : au niveau des données d'entrée et au niveau de la définition des classes. Les itinéraires techniques, l'environnement physique et économique, les temps de travaux sont différents pour chaque type et sont des paramètres pris en compte pour le calcul ou l'estimation des critères. Le **Tableau 6** présente quelques paramètres et résultats des simulations affectant l'évaluation des critères.

Le critère rentabilité évalué par la marge nette dispose d'une définition de classe spécifique à chaque type de système de culture (**Tableau 2, Annexe V**). Ce critère est évalué par la marge nette à l'hectare. Les types de système de culture ayant une surface différente, la marge annuelle dégagée est différente pour une même valeur de marge nette à l'hectare. Par exemple, une marge à l'hectare de 2 000 €/ha/an pour un système de culture A avec une surface totale de 5 ha donne une marge du système de 10 000 €/an. Un système de culture B avec une surface de 100 ha et la même marge à l'hectare a une marge de 200 000 €/an. Ainsi, cette même valeur de marge à l'hectare, 2 000 €/ha/an est faible pour le système A et très élevée pour le système B.

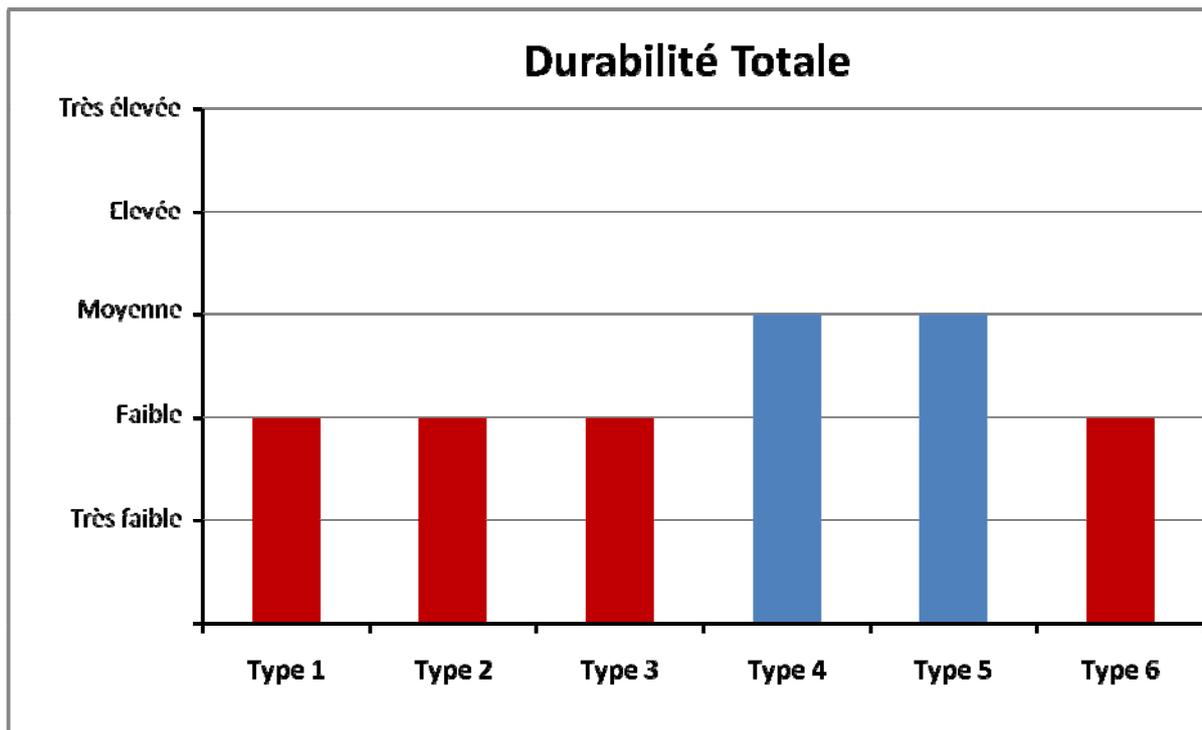


Figure 17. Notes obtenues de durabilité totale

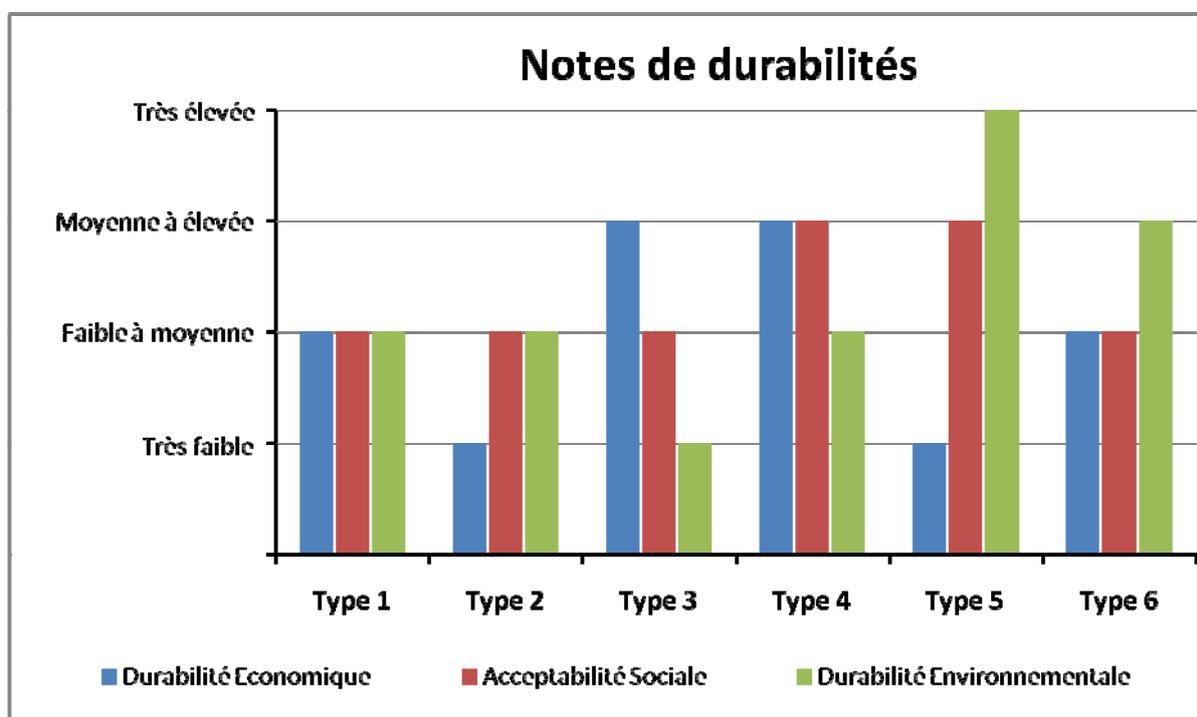


Figure 18. Notes obtenues pour les 3 dimensions de la durabilité totale

IV. Résultats

IV. 1. Durabilité actuelle des exploitations

Dans un premier temps nous aborderons les résultats de l'évaluation sur le plan de la durabilité totale. Enfin, nous analyserons les résultats du point de vue des 3 dimensions de la durabilité.

IV. 1. 1. La Durabilité Totale

La durabilité totale de chaque type de système de culture en situation actuelle (sans innovation) a été évaluée. Les résultats sont représentés graphiquement (**Figure 17**).

La variabilité de durabilité totale entre les types de système de culture est faible, elle ne se décline que sur deux des cinq niveaux d'échelle. Elle n'est jamais élevée.

Les types 1, 2, 3 et 6 présentent une durabilité totale faible. Les types 4 et 5 semblent plus durables en se démarquant des autres types avec une durabilité totale moyenne.

La durabilité totale correspond à l'agrégation des critères "durabilité économique", "acceptabilité sociale" et "durabilité environnementale". Chacun de ces critères a une importance égale dans la fonction d'agrégation.

En fonction des notes obtenues pour les trois dimensions de la durabilité, les six types de système de culture peuvent être classés dans trois catégories :

- aucune des dimensions de la durabilité n'est acceptable pour les types 1 et 2
- une durabilité économique satisfaisante pour les types 3 et 4
- une acceptabilité sociale satisfaisante pour les types 4 et 5
- une bonne durabilité environnementale pour les type 5 et 6

Les types 4 et 5 se retrouvent dans deux catégories expliquant leur durabilité totale moyenne.

IV. 1. 2. La Durabilité Economique

Les types 2 et 5 obtiennent une note très faible. Les types 1 et 6 présentent une durabilité économique moyenne. Enfin, les types 3 et 4 ont une note moyenne à élevée. (**Figure 18**)

La note très faible de durabilité économique des types 2 et 5 s'explique par le fait que pour ces types, l'autonomie économique et la rentabilité sont très faibles. Ces deux critères ont un poids important (respectivement 43% et 40%) dans la fonction d'agrégation de la durabilité économique. Les tonnages² en bananes des types 2 et 5 correspondent aux tonnages les plus faibles, respectivement 19 et 13 t/ha/an. Les coûts de production sont élevés pour tous les types du fait des forts besoins en main d'œuvre pour la production de banane.

Les types 1 et 6 obtiennent une note faible à moyenne pour leur durabilité économique. Pour ces deux types, la rentabilité est aussi très faible mais l'autonomie économique est meilleure (faible à moyenne).

Les types 3 et 4 correspondent aux types intensifs, les tonnages en bananes sont de 35 et 33 t/ha/an leur permettant d'avoir une rentabilité élevée et une autonomie économique faible à moyenne.

² Correspond à la quantité de bananes vendues. Le tonnage correspond au rendement diminué du pourcentage de bananes écartées au triage. Le pourcentage de tri varie selon le type de système de culture (**Tableau 6**).

IV. 1. 3. L'Acceptabilité Sociale

L'évaluation de l'acceptabilité sociale est peu variable selon le type de système de culture (**Figure 18**). Elle présente la même variabilité que l'évaluation de la durabilité totale.

Cette dimension de la durabilité totale résulte de l'agrégation des critères "contribution à l'emploi", "difficultés opérationnelles" et "risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs". La contribution à l'emploi est faible et le niveau des difficultés opérationnelles est moyen pour tous les types. Le risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs est nul pour le type 5, faible pour le type 4 alors qu'il est moyen pour les autres types.

Le risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs qui compte pour 37% dans la fonction d'agrégation de l'acceptabilité sociale est le critère qui explique la variabilité des notes obtenues.

Le risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs est nul pour le type 5, faible pour le type 4 alors qu'il est moyen pour les autres types. Dans l'estimation du risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs, seul les traitements nématicides sont pris en compte car classés nocifs. Le type 5 ne fait aucun traitement phytosanitaire, le type 4 effectue 0,8 traitement nématicide par année, les types 1 et 6, un traitement par an, le type 2, 1,5 traitement par an et le type 3 effectue 2,6 traitements par an sur la durée de la culture de la banane.

IV. 1. 4. La Durabilité Environnementale

La durabilité environnementale se décline sur la totalité des niveaux de note. Ainsi, le type 3 obtient une note très faible ; les types 1, 2 et 4, une note faible à moyenne. Les types 5 et 6 présentent de bonnes notes : moyenne à élevée pour le type 6 tandis qu'elle est très élevée pour le type 5 (**Figure 18**)

L'impact sur la qualité du milieu est moyen à élevé pour les types 1 à 4 et leur note de conservation de la biodiversité est très faible. Enfin leur pression sur les ressources est moyenne à élevée sauf pour le type 3 où elle est très élevée. Les types 1, 2 et 4 correspondent à des types de système de culture où la bananeraie est replantée tous les 5 à 6 ans et où l'application de produits phytosanitaires est systématique. Le type 3, type de système de culture le plus intensif est aussi le seul type où la bananeraie est irriguée.

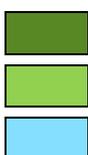
Les types 5 et 6 sont des systèmes de culture à bananeraie pérenne n'effectuant aucun traitement fongicide. Pour le type 5 qui n'effectue pas non plus de traitements herbicides et nématicides, l'impact sur la qualité du milieu est alors très faible et la conservation de la biodiversité moyenne à élevée. Le type 6 effectue ces traitements, l'impact sur la qualité du milieu est alors faible à moyen et la conservation de la biodiversité est très faible. Enfin, la note de pression sur les ressources est faible à moyenne pour le type 6 et moyenne à élevée pour le type 5.

Bien qu'il n'y ait pas de différence de note pour la conservation de la biodiversité entre les types 1, 2, 3, 4 et 6, le type 6 a une pression de traitements phytosanitaires plus faible que les types 1 à 4. Ce critère a pourtant une pondération élevée (62%) dans la fonction d'agrégation de la conservation de la biodiversité mais une très faible diversité de cultures n'est pas compensée par une pression de traitements phytosanitaires moyenne (choix des concepteurs de MASC lors de la définition des règles de décision).

		N° Innovation	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Sans Innovation		0	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible
Suppression de l'utilisation de pesticides	Nématicides	1	=	+	=	=	=	+
	Herbicides	2	=	=	=	=	=	=
	Nématicides + Herbicides	3	+	=	+	=	=	=
Rotations	<i>Crotalaria juncea</i>	4	=	+	=	=	=	+
	Jachère	5	+	+	=	=	=	=
	Ananas	6	=	=	=	-	=	=
Systèmes intégrés	Système intégré 1 (plaine)	7	+	+	+	=	=	+
	Système intégré 2 (montagne)	8	+	+	+	=	=	=
	Système biologique	9	++	++	+	=	=	+
Cultures associées	<i>Canavalia ensiformis</i>	10	=	=	=	=	=	=
	<i>Brachiaria decumbens</i>	11	=	=	+	=	=	=
	<i>Impatiens sp.</i>	12	=	=	=	=	-	=
Raisonnements des apports	Nématicides	13	=	=	=	=	=	+
	Herbicides	14	=	=	=	=	=	=
	Fertilisants	15	=	=	=	-	=	=
Nouvelles variétés	91X	16	=	=	=	-	=	=
	91Y	17	=	=	+	=	=	+
	91Y en système biologique	18	++	+	+	=	-	=

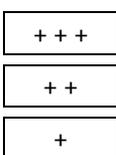
Légende

Note de Durabilité Totale



Très élevée
Elevée
Moyenne

Amélioration de la durabilité

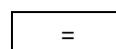


+++ de 3 notes
++ de 2 notes
+ de 1 note

Diminution de la durabilité



- de 1 note
-- de 2 notes



= Pas d'amélioration

Tableau 7. Résultats d'évaluation et évolution de la durabilité totale par rapport à la situation actuelle sans innovation

IV. 1. 5. Synthèse

Généralement, les types 1 et 2 n'obtiennent de bonnes notes pour aucune des 3 dimensions de la durabilité totale. Les types 3 et 4 ont une durabilité économique acceptable. Les types 4 et 5 se caractérisent par une bonne acceptabilité sociale. Enfin, la durabilité environnementale est élevée pour les types 5 et 6.

Plus précisément, toutes les dimensions de la durabilité sont à améliorer pour les types 1 et 2 ; pour le type 3 ce sont les dimensions sociales et environnementales qui doivent être améliorées ; le type 4 doit augmenter le niveau de sa durabilité environnementale ; pour le type 5 c'est uniquement la durabilité économique ; et enfin pour le type 6 ce sont les dimensions économiques et sociales qui doivent être améliorées (**Figure 18**).

En comparant les résultats des différents types, des pistes d'amélioration peuvent être proposées :

- la réduction ou l'arrêt de l'utilisation des traitements phytosanitaires pour améliorer la durabilité environnementale et l'acceptabilité sociale
- la réduction des charges, l'augmentation du rendement ou la diminution du pourcentage de tri pour améliorer la durabilité économique.

IV. 2. Evaluation *ex ante* de la durabilité des systèmes de cultures innovants

De même que pour la durabilité des systèmes actuels, les résultats de la durabilité totale seront présentés suivis de l'analyse des résultats obtenus pour chacune des dimensions de la durabilité totale. Nous avons choisi de présenter également l'évolution des résultats par rapport à la situation actuelle.

IV. 2. 1. La Durabilité Totale

Sur les 108 couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » qui ont été évalués, la durabilité totale est (**Tableau 7**) :

- augmenté de deux niveaux dans 3 cas,
- augmenté d'un niveau dans 23 cas,
- la même dans 77 cas,
- baissé de un niveau dans 5 cas.

On peut affirmer que, généralement, l'ensemble des systèmes innovants n'affecte pas ou augmente la durabilité totale des systèmes actuels.

De la manière, sur les 108 couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » qui ont été évalués, la durabilité totale est :

- faible pour 51 cas,
- moyenne pour 54 cas
- élevée pour 3 cas

L'ensemble des couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » conduisent à une durabilité totale faible à moyenne.

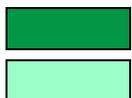
Deux systèmes innovants (les systèmes biologiques en variété classique et en variété 91Y) obtiennent une durabilité totale élevée mais uniquement chez les types 1 et 2 en améliorant la note de deux niveaux.

Pour les types 4 et 5, aucune des innovations n'améliore la note de durabilité totale, certaines diminuant même cette note. Ces deux types ont déjà une note de durabilité totale en situation actuelle moyenne, plus élevée que celles des autres types.

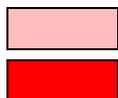
		N° Innovation	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Sans Innovation		0	Faible à moyenne	Très faible	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Très faible	Faible à moyenne
Suppression de l'utilisation de pesticides	Nématicides	1	=	++	=	=	=	=
	Herbicides	2	=	=	=	=	=	-
	Nématicides + Herbicides	3	=	=	=	=	=	-
Rotations	<i>Crotalaria juncea</i>	4	+	++	=	=	=	+
	Jachère	5	++	++	=	=	=	=
	Ananas	6	++	+++	+	+	++	+
Systèmes intégrés	Système intégré 1 (plaine)	7	+	++	=	=	=	-
	Système intégré 2 (montagne)	8	+	++	=	=	=	=
	Système biologique	9	++	+++	+	=	++	+
Cultures associées	<i>Canavalia ensiformis</i>	10	=	=	=	=	++	-
	<i>Brachiaria decumbens</i>	11	-	=	=	=	=	-
	<i>Impatiens sp.</i>	12	-	=	=	=	=	-
Raisonnements des apports	Nématicides	13	=	+	=	=	=	=
	Herbicides	14	=	+	=	=	=	=
	Fertilisants	15	-	=	--	--	=	-
Nouvelles variétés	91X	16	-	=	--	--	=	-
	91Y	17	=	+	=	=	=	=
	91Y en système biologique	18	++	+++	=	=	=	=

Légende

Note de Durabilité Economique

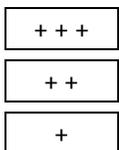


Très élevée
Moyenne à élevée

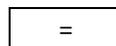


Faible à moyenne
Très faible

Amélioration de la durabilité



de 3 notes
de 2 notes
de 1 note



Pas d'amélioration

Diminution de la durabilité



de 1 note
de 2 notes

Tableau 8. Résultats d'évaluation et évolution de la note de durabilité économique par rapport à la situation actuelle

Les cultures associées et le raisonnement des apports ont de façon générale une durabilité totale faible et n'améliorent pas la durabilité totale des types de système de culture.

La suppression de l'utilisation de pesticides et les rotations obtiennent de meilleures notes pour moins de la moitié des types de système de culture.

Pour les nouvelles variétés, l'innovation 18 ressort en améliorant la note pour la moitié des types.

Les systèmes intégrés permettent d'obtenir une durabilité totale moyenne chez pratiquement tous les types de système de culture. A noter que le système intégré 2, imaginé spécifiquement pour les types 4 à 6 n'améliore pas la durabilité.

Chez les types 4 et 5, l'ensemble des innovations ont une durabilité moyenne alors que chez le type 6 elle est faible.

Ainsi, on pourrait affirmer que les innovations 7 et 9 permettraient d'améliorer (et au moins de ne pas diminuer) la durabilité totale chez tous les types de système de culture, elles semblent donc les plus prometteuses d'après notre analyse.

IV. 2. 2. La Durabilité Economique

La durabilité économique des couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » est (**Tableau 8**) :

- augmenté de trois niveaux dans 3 cas,
- augmenté de deux niveaux dans 12 cas,
- augmenté d'un niveau dans 12 cas,
- la même dans 65 cas,
- baissé de un niveau dans 12 cas,
- baissé de deux niveaux dans 4 cas

Les couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » obtiennent de durabilité économique :

- très élevée pour 10 cas,
- moyenne à élevée pour 43 cas,
- faible à moyenne pour 17 cas,
- très faible pour 38 cas.

Dans un premier temps nous ne considérons uniquement les types 1, 2, 5 et 6. Pour ces types, la suppression de l'utilisation de pesticides, les cultures associées, le raisonnement des apports et les nouvelles variétés en conventionnel obtiennent des notes de durabilité économique très faible ou faible à moyenne. Aussi, par rapport à la situation actuelle, il n'y a pas d'amélioration ou la note est diminuée. Ce type d'innovations induisent une économie d'intrants (produits phytosanitaires, engrais) mais les charges de main d'œuvre augmentent (passage à du désherbage manuel, semis cultures associées) ou/et le tonnage en banane est diminué dans certains cas. Les tonnages des nouvelles variétés sont faibles (6 à 19 t/ha/an). Mais, bien que le prix de vente soit augmenté de 50% par rapport à la variété classique, la marge dégagée n'est pas suffisante.

Les rotations, les systèmes intégrés et la variété 91Y en système biologique obtiennent une bonne durabilité économique ("moyenne à élevée" et "très élevée") pour les types 1 et 2 et améliorent fortement la situation actuelle. Mais chez les types 5 et 6 ils obtiennent les notes "très faible" ou "moyenne à faible" sauf pour l'introduction de l'ananas dans la rotation et le système biologique (durabilité économique moyenne à élevée).

Pour les types 3 et 4 l'ensemble des innovations ont une durabilité économique moyenne à élevée. Ces deux types disposent de surfaces relativement importantes (respectivement 82ha et

		N° Innovation	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Sans Innovation		0	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Faible à moyenne
Suppression de l'utilisation de pesticides	Nématicides	1	+	+	+	=	=	+
	Herbicides	2	=	=	=	-	=	=
	Nématicides + Herbicides	3	+	+	+	=	=	=
Rotations	<i>Crotalaria juncea</i>	4	=	+	=	=	=	=
	Jachère	5	+	+	=	=	=	=
	Ananas	6	=	-	-	-	-	-
Systèmes intégrés	Système intégré 1 (plaine)	7	+	+	+	=	=	+
	Système intégré 2 (montagne)	8	+	=	=	-	=	=
	Système biologique	9	+	+	=	=	-	+
Cultures associées	<i>Canavalia ensiformis</i>	10	=	=	=	-	-	=
	<i>Brachiaria decumbens</i>	11	=	=	=	=	=	=
	<i>Impatiens sp.</i>	12	=	=	=	-	-	=
Raisonnements des apports	Nématicides	13	+	+	+	=	=	+
	Herbicides	14	=	=	=	=	=	=
	Fertilisants	15	=	=	=	=	=	=
Nouvelles variétés	91X	16	+	+	+	=	=	+
	91Y	17	+	+	+	=	=	+
	91Y en système biologique	18	+	=	=	=	-	=

Légende

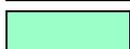
Note d'Acceptabilité Sociale



Très élevée



Faible à moyenne

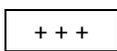


Moyenne à élevée

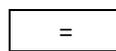


Très faible

Amélioration de la durabilité

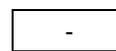


de 3 notes



Pas d'amélioration

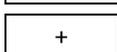
Diminution de la durabilité



de 1 note



de 2 notes



de 1 note

Tableau 9. Résultats d'évaluation et évolution de la note d'acceptabilité sociale par rapport à la situation actuelle

28ha), ils sont donc moins sensibles économiquement à des petites variations du tonnage. Les innovations 15 et 16, où les pertes en tonnage sont de 10 à 24 t/ha/an, diminuent fortement leur durabilité économique.

Chez le type 5, l'ensemble des innovations ont une durabilité économique très faible parce que ce type de système de culture correspond au prix de vente de la banane le plus faible (0,45€/kg).

L'introduction de l'ananas dans la rotation (innovation 6) obtient une durabilité économique moyenne à élevée et très élevée et améliore la durabilité économique pour tous les types de système de culture en apportant un revenu supplémentaire.

C'est aussi le cas de la conduite en agriculture biologique (innovation 9). Le tonnage obtenu augmente en moyenne de 115% par rapport à la situation actuelle (conduite conventionnelle) aussi le prix de vente est augmenté de 20%.

Dans un objectif d'amélioration de la durabilité économique de l'ensemble des types de système de culture de la région, les innovations 6 et 9 sont à promouvoir.

IV. 2. 3. L'Acceptabilité Sociale

L'acceptabilité sociale des 108 couples est (**Tableau 9**) :

- augmenté d'un niveau dans 31 cas,
- la même dans 64 cas,
- baissé de un niveau dans 13 cas.

Les couples « Types d'exploitation * Système de culture innovant » obtiennent de durabilité économique :

- moyenne à élevée pour 57 cas,
- faible à moyenne pour 48 cas,
- très faible pour 3 cas.

Dans l'ensemble, les innovations ont une acceptabilité sociale moyenne (**Tableau 9**). Elle est très faible pour l'introduction de l'ananas dans la rotation chez les types 2, 3 et 6. Les cultures associées ont une acceptabilité sociale faible chez l'ensemble des types.

La suppression de l'utilisation de pesticides, les systèmes intégrés et les nouvelles variétés améliorent la note d'acceptabilité sociale, innovations pour lesquelles les traitements nématicides ont été réduits ou supprimés. En effet, le critère "risque de toxicité phytosanitaire" a un poids de 37% dans la fonction d'agrégation de l'acceptabilité sociale. Et, dans le mode de calcul du critère, seuls les traitements nématicides sont pris en compte.

L'introduction de l'ananas dans la rotation diminue l'acceptabilité sociale pour l'ensemble des types par une augmentation des difficultés de conduite du système (opérations spécifiques supplémentaire, gestion de la culture et calendrier cultural différents).

A noter que pour les types 4 et 5, aucune innovation l'acceptabilité sociale n'est pas améliorée par rapport à la situation actuelle, et pour un quart de celles-ci elle est diminuée. Ces deux types obtiennent déjà une bonne note d'acceptabilité sociale en situation actuelle (moyenne à élevée) qui est donc difficile à améliorer.

Ici, les innovations 1, 7, 13, 16 et 17 permettraient d'avoir une note d'acceptabilité sociale acceptable chez l'ensemble des types.

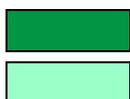
IV. 2. 4. La Durabilité Environnementale

Pour aucun des types de système de culture, il n'y a pas d'innovation réduisant la durabilité environnementale (**Tableau 10**).

		N° Innovation	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Sans Innovation		0	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Très faible	Faible à moyenne	Très élevée	Moyenne à élevée
Suppression de l'utilisation de pesticides	Nématicides	1	=	=	=	=	=	=
	Herbicides	2	=	=	+	+	=	=
	Nématicides + Herbicides	3	+	+	++	+	=	+
Rotations	Crotalaria juncea	4	=	=	=	=	=	=
	Jachère	5	=	=	=	=	=	=
	Ananas	6	=	=	+	=	=	=
Systèmes intégrés	Système intégré 1 (plaine)	7	+	+	++	+	=	+
	Système intégré 2 (montagne)	8	+	+	++	+	=	+
	Système biologique	9	++	++	+++	++	=	+
Cultures associées	Canavalia ensiformis	10	+	+	+	+	=	+
	Brachiaria decumbens	11	+	+	++	+	=	+
	Impatiens sp.	12	+	+	+	+	=	+
Raisonnements des apports	Nématicides	13	=	=	=	=	=	=
	Herbicides	14	=	=	=	=	=	+
	Fertilisants	15	=	=	+	=	=	=
Nouvelles variétés	91X	16	=	=	+	=	=	=
	91Y	17	=	=	+	=	=	=
	91Y en système biologique	18	++	++	+++	++	=	+

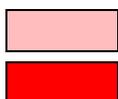
Légende

Note de Durabilité Environnementale



Très élevée

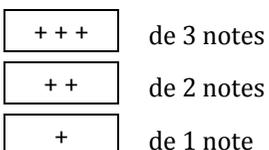
Moyenne à élevée



Faible à moyenne

Très faible

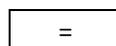
Amélioration de la durabilité



+++ de 3 notes

++ de 2 notes

+ de 1 note



= Pas d'amélioration

Diminution de la durabilité



- de 1 note

-- de 2 notes

Tableau 10. Résultats d'évaluation et évolution de la note de durabilité environnementale par rapport à la situation actuelle

En ne considérant que les types 1 à 4, la suppression de l'utilisation de pesticides, les rotations, le raisonnement des apports et les nouvelles variétés en conventionnel ont une durabilité environnementale faible. Pour le type 3, la durabilité environnementale de certaines de ces innovations est très faible.

La suppression des herbicides et des nématicides, les systèmes intégrés, les cultures associées et la variété 91Y en système biologique ont une durabilité environnementale élevée. Elles améliorent la durabilité environnementale de l'ensemble des systèmes de culture et l'amélioration est importante pour le type 3. Les traitements herbicides sont supprimés pour ces innovations. En situation actuelle, le nombre de traitements herbicides varie entre 3,6 et 5,1 traitements par année sur la durée de la bananeraie. Les traitements phytosanitaires influencent l'évaluation des critères "impact sur la qualité des eaux" et "conservation de la biodiversité". Il semble que la suppression des nématicides n'apporte pas d'amélioration de la durabilité environnementale (innovations 1, 13, 16 et 17).

Chez les types 5 et 6, les innovations ont une note élevée. Les niveaux d'intrants (pesticides et engrais) sont plus faibles par rapport à l'ensemble.

Les innovations 3, 7 à 12 et 18 apparaissent comme celles à soutenir pour une durabilité environnementale élevée chez l'ensemble des systèmes de culture.

IV. 2. 5. Synthèse

Aussi, bien pour la durabilité totale que pour chacune des dimensions, certaines innovations permettent d'aboutir à une note de durabilité acceptable chez l'ensemble des types de système de culture : les innovations 7 et 9 pour la durabilité totale, les innovations 6 et 9 pour la durabilité économique, les innovations 1, 7, 13, 16 et 17 pour l'acceptabilité sociale et les innovations 3, 7 à 12 et 18 pour la durabilité environnementale. On remarque ici que l'évaluation globale en considérant que la durabilité totale permet de sélectionner l'innovation 9 pourtant elle n'obtient pas une note d'acceptabilité sociale convenable chez l'ensemble des types de système de culture. De même, la durabilité économique n'est pas satisfaisante chez tous les types pour l'innovation 7. L'évaluation par une note globale "dilue" l'information. Aussi, ce résultat est dépendant de la définition de la fonction d'agrégation du critère "durabilité totale" qui autorise la compensation d'une faible note d'un des critères (ici, les dimensions de la durabilité totale) par les notes moyennes ou élevées des autres critères. Nous avons choisi de conserver la fonction d'agrégation telle qu'elle avait été définie par les concepteurs de MASC. Nous aurions pu définir autrement cette fonction : pas de compensation possible, à l'image du facteur limitant. La note de durabilité totale correspondrait à la note la plus faible d'une des trois dimensions. Ainsi, un autre résultat serait obtenu : il n'y a pas d'innovation ayant une durabilité totale acceptable chez tous les types de système de culture. Nous retrouvons ce résultat par l'analyse de l'évaluation par dimension de la durabilité totale. De plus, nous pouvons proposer par type de système de culture, une sélection des innovations avec une note au moins égale à "moyenne à élevée" pour chacune des dimensions de la durabilité totale. Le **Tableau 11** présente les innovations sélectionnées par type de système de culture et la note de durabilité totale obtenue. On remarque que les innovations 7 et 9 sont sélectionnées pour 4 types sur 6, et qu'aucune innovation n'est sélectionnée pour le type 5. Nous avons souligné dans l'évaluation de la situation actuelle que pour le type 5, seule la durabilité économique devait être améliorée. Ainsi, en acceptant que l'acceptabilité sociale pour ce type soit faible à moyenne (et diminue donc), les innovations 6, 9 et 10 sont sélectionnées.

D'autre part, suivant le type, une innovation n'a pas la même durabilité. Par exemple, l'innovation 18 a une durabilité totale élevée chez le type 1, moyenne chez les types 2, 3 et 4 tandis

		Types de système de culture						
		N° Innovation	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Suppression de l'utilisation de pesticides	Nématicides	1						
	Herbicides	2						
	Nématicides + Herbicides	3			X	X		
Rotation	Crotalaria juncea	4						
	Jachère	5						
	Ananas	6						
Systèmes intégrés	Système intégré 1 (plaine)	7	X	X	X	X		
	Système intégré 2 (montagne)	8	X					
	Système biologique	9	X	X		X		X
Cultures associées	Canavalia ensiformis	10						
	Brachiaria decumbens	11				X		
	Impatiens sp.	12						
Raisonnements des apports	Nématicides	13						
	Herbicides	14						
	Fertilisants	15						
Nouvelles variétés	91X	16						
	91Y	17						
	91Y en système biologique	18	X				X	

Tableau 11. Sélection des innovations pour lesquelles chacune des 3 dimensions de la durabilité totale obtient une note élevée.

qu'elle est faible chez les types 5 et 6. On voit ici l'importance de la prise en compte de la diversité régionale lorsqu'une innovation est proposée à l'ensemble des exploitations. Ainsi, l'évaluation effectuée en ne considérant qu'un système de culture moyen peut amener à sélectionner et à proposer une innovation évaluée durable qui ne le serait effectivement que dans quelques exploitations.

Finalement, les innovations 7 et 9 semblent prometteuses et devraient être testées en champs. Les innovations 3, 6, 8, 10, 11 et 18 sont également à encourager pour proposer des innovations plus spécifiquement aux différents types de système de culture.

V. Discussion

V. 1. Les objectifs sont-ils atteints ?

Une méthode d'évaluation *ex ante* de la durabilité des systèmes de culture, MASC, a été adaptée au contexte de la culture de la banane en Guadeloupe. Elle a permis d'évaluer et de comparer la durabilité de 18 prototypes de systèmes de culture innovants, en tenant compte de la diversité régionale des systèmes de cultures au moyen d'une typologie. A travers une note globale de durabilité issue de l'agrégation de nombreux critères représentant les 3 dimensions de la durabilité (économique, sociale, environnementale), cette évaluation a permis d'identifier les couples « type de système de culture * innovation » qui sont les plus prometteurs et qu'il conviendrait maintenant de tester à travers des essais à la parcelle *on farm*.

Nos résultats montrent qu'il est important de considérer la diversité des systèmes de culture dans l'évaluation car les innovations n'ont généralement pas les mêmes impacts dans chacun des types. Il a par exemple été mis en évidence des innovations aboutissant à une durabilité "élevée" chez un type et "faible" chez un autre. Ceci s'explique par le fait que d'une part les problèmes de durabilité sont différents pour chaque type de systèmes de culture, et d'autre part que ceux-ci ont des caractéristiques hétérogènes. Ceci montre l'intérêt de proposer un nombre élevé d'innovations afin que chaque système de culture puisse trouver l'innovation qui lui permette d'avoir une bonne durabilité ou au moins de l'améliorer.

Pour parvenir à ces objectifs, l'outil MASC s'est révélé approprié car il permet de proposer un référentiel d'évaluation de la durabilité dans sa globalité, et sa structure est suffisamment souple pour être adaptée à des contextes particuliers. Il permet de discriminer de manière assez satisfaisante une large gamme de systèmes de culture innovants pour identifier les plus prometteurs, c'est-à-dire ceux qui conduisent à des niveaux de durabilité meilleurs pour tous les types de situations rencontrées à l'échelle régionale.

V. 2. Les limites de notre étude

Notre travail présente des limites en différents points qu'il convient de discuter. Certaines limites sont inhérentes à la méthode que nous avons adoptée, d'autres sont à relier à des limites de l'outil MASC.

En premier lieu, il nous semble que les acteurs de la filière pourraient être plus impliqués dans le processus d'évaluation. En effet, l'évaluation les concerne directement, pourtant, ils n'y ont pas participé. Il aurait été intéressant d'avoir leur vision de la durabilité surtout pour la dimension acceptabilité sociale qui prend en compte des facteurs déterminants pour l'adoption et qui font qu'une innovation aura plus de chance de durer.

Le pouvoir discriminatoire de l'outil MASC-banane pourrait être amélioré en augmentant le nombre de classes de discrétisation des critères. Par ailleurs, la définition des seuils des classes dépend de l'opinion de l'utilisateur et peut ainsi induire une certaine subjectivité dans les résultats. Aussi, la définition des classes que nous avons faite peut paraître stricte par rapport à celle axée sur la logique floue qui règle le problème des valeurs proches des valeurs seuils. Nous avons choisi de fixer les valeurs seuils pour la majorité des critères en fonction de la distribution des valeurs. Ceci s'explique par le fait que nous avons un nombre important de couples « innovation * type de système de cultures » à discriminer.

Les modes de calcul de certains critères n'ont pas toujours été validés. Par exemple : la consommation en énergie a été évaluée à l'aide d'équations et de constantes issues de la littérature mais sont-elles valides pour notre contexte ? Par manque de données ou de références régionales, certains critères ont été calculés pour l'ensemble de la rotation en ne considérant uniquement que la culture de la banane. Bien que la banane représente au minimum 80% de la durée de la succession qui est de 6 ans minimum, la précision de l'évaluation pourrait être améliorée en prenant mieux en compte les cultures de rotation dans les simulations.

Enfin, l'absence d'analyse de sensibilité est un point faible de notre étude. Cette analyse aurait pu mettre en évidence quels sont les critères qui influencent le plus le résultat final, mais aussi d'identifier la robustesse des innovations sous différents jeux de pondération des critères, correspondant à différents acteurs économiques. Ainsi, les critères nécessitant une plus grande précision des données auraient été mis en évidence.

V. 3. Perspectives

Des travaux complémentaires pourraient être engagés pour améliorer la précision et la robustesse de l'évaluation.

Comme il a été dit précédemment, il n'a pas été fait d'analyse de sensibilité. Une première chose à faire pour la suite de notre travail serait d'effectuer une analyse de sensibilité sur différents jeux de pondérations de critères et de seuils de discrétisation (seuil des classes) correspondant à différents types d'acteur de la filière. Afin de prendre en considération la vision de ces acteurs, un comité d'expert pourrait être monté.

Par ailleurs la précision du paramétrage pourrait être améliorée. D'une part, les simulations pourraient être relancées en actualisant les données, notamment les données économiques (évolution du prix de la banane, du montant des aides, du coût des intrants), mais aussi en prenant mieux en compte toutes les cultures en rotation et des pratiques culturales qui ne l'ont pas été, ou d'une manière trop simplifiée.

Le travail d'adaptation de MASC pourrait être amélioré en prenant en compte certains critères omis de notre arbre hiérarchique mais qui pourraient avoir une importance significative en terme de durabilité dans le contexte de la culture de la banane en Guadeloupe. Par exemple, la banane et l'ananas (proposé en rotation) sont des cultures exigeantes en potassium. Un indicateur sur la pression exercée sur les ressources de potassium et un sur la fertilité potassique peuvent être construits pour être ensuite intégrés à l'arbre. Par ailleurs l'arbre pourrait comporter des critères relatifs à des problématiques s'exprimant à l'échelle territoriale comme l'impact sur la qualité de l'eau du réseau hydrologique de la région, l'impact économique sur l'ensemble de la filière, et l'impact sur la biodiversité des écosystèmes environnants (lagons, mangrove, forêts, etc.).

Enfin, les prototypes de systèmes de culture innovants identifiés comme les plus prometteurs sont à tester *in situ* dans différents types d'exploitations pour évaluer leur cohérence fonctionnelle et agronomique en conditions réelles.

VI. Conclusion

L'outil MASC nous a permis d'atteindre nos objectifs qui étaient d'évaluer la durabilité d'un ensemble de systèmes de culture innovants. En tenant compte de la diversité régionale des systèmes de culture existants, la durabilité a été évaluée au travers d'une structure hiérarchique décomposant une durabilité globale en trois sous-dimensions : économique, sociale et environnementale. Cette évaluation systémique s'effectue à travers un grand nombre de critères qui s'agrègent pour aboutir à une note globale de durabilité. La méthode a pu être adaptée à la culture de la banane en Guadeloupe où différents systèmes de cultures sont « candidats » à l'innovation. 18 innovations ont été évaluées chez 6 types de système de cultures bananiers différents. La prise en compte de la diversité des systèmes de culture a pu mettre en évidence une variabilité de l'impact des innovations sur la durabilité des types de système de culture.

Deux systèmes innovants ont un impact positif sur la durabilité pour tous les types et conduisent à des notes de durabilité totale au moins « moyenne » :

- le système intégré avec *Brachiaria decumbens* dans la rotation puis plantation sous couvert du *B. decumbens* et culture de la banane en association avec cette même culture
- le système biologique en variété classique avec *Crotalaria juncea* dans la rotation puis culture de la banane en association avec *Canavalia ensiformis* et apport régulier de fertilisants organiques

Ces deux systèmes innovants apparaissent comme les plus prometteurs. Le système biologique obtient même une durabilité élevée chez les types 1 et 2.

Il conviendrait de tester *in situ* ces systèmes innovants pour leur évaluation fonctionnelle et agronomique. Bien qu'améliorant la durabilité, ces innovations pourraient ne pas être adoptées. Aussi, d'autres systèmes innovants plus spécifiquement adaptés à chaque type d'exploitation seraient également à tester au champ.

Enfin, notre méthode d'évaluation pourrait être améliorée par des études complémentaires visant à accroître la précision des données d'entrées mais surtout par l'implication des acteurs de la filière. A cet effet, l'adaptation de l'outil MASC que nous avons produite au cours de ce travail pourra servir de point de départ.

Références bibliographiques

- AGRESTE LA STATISTIQUE AGRICOLE, 2009. L'agriculture guadeloupéenne en 2007, Direction de l'agriculture et de la forêt de la Guadeloupe, 4, 28p. [en ligne]. Format PDF. Disponible sur <<http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/D97109A01.pdf>>
- ALLEN, R., L. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. [en ligne]. Format HTM. [consulté le 03 août 2009] Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Andreoli M., Rossi R., Tellarini V., 1999. Farm sustainability assessment: some procedural issues, *Landscape and Urban Planning*, 46, 41-50.
- Andreoli M., Tellarini V., 2000. Farm sustainability evaluation: methodology and practice, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 77, 43–52.
- Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Doré T., Guichard L., Reau R., Sadok W., 2008. MASC Version 1.0. Un outil pour l'analyse de la durabilité des systems de culture. Présentation générale & principes d'utilisation. Manuel, Communication Personnelle.
- ASAE Standards, 2006 ASAE Standards, 2006. Agricultural machinery management data. ASAE D497.5 FEB2006. ASAE, St. Joseph, MI
- Bana e Costa C., Stewart T., Vansnick J.C., 1997. Multicriteria decision analysis: Some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings, *European Journal of Operational Research* 99, 28-37.
- Barber, A (2004), Total Energy & Carbon Indicators for New Zealand Kiwifruit Orchards: A Pilot Survey, No City: AgriLINK New Zealand Ltd. In Saunders, C., Barber, A. and Taylor, G. (2006), Food Miles – Comparative Energy/Emissions Performance of New Zealand's Agriculture Industry. AERU Research Report No. 285, Lincoln University, Canterbury, NZ, July 2006.
- Blazy J.M., 2008. Evaluation *ex ante* de systèmes de culture innovants par modélisation agronomique et économétrique : de la conception à l'adoption. Cas des systèmes de cultures bananiers de Guadeloupe. Th Doctorat, SupAgro Montpellier, Montpellier. 190p.
- Blazy J.M., Diman J.L., 2009. Rapport final du programme de recherche « Economie de l'innovation : conditions d'adoption de systèmes de cultures innovants en substitution d'intrants chimiques dans les exploitations bananières en Guadeloupe. ». INRA Antilles Guyane, Petit-Bourg. 29p.
- Bockstaller C. et Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : La méthode INDIGO. *Oléoscope*, 85, 4-6.
- Bockstaller C., Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems* 76, 639-653.
- Bockstaller C., Girardin, P., 2007. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO® version 1.8, juin 2007. Communication personnelle.

- Bockstaller C., Guichard L., Keichinger O., Girardin P., Galan M.B., Gaillard G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 223–235.
- Bockstaller C., Guichard L., Makowski D., Aveline A., Girardin P., Plantureux S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 139-149.
- Bohanec M., Messéan M., Scatasta S., Angevin F., Griffiths B., Krogh P.H., Znidarsic M., Dzeroski S., 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops, *Ecol. Model.* (in press)
- Bohanec, M., Džeroski, S., Žnidaršič, M., Messéan, A., Scatasta, S., Wesseler, J., 2004. Multi-attribute modeling of economic and ecological impacts of cropping systems, *Informatica* 28, 387-392.
- Briquel V., Vilain L., Bourdais J.L., Girardin P., Mouchet C., Viaux P., 2001. La méthode IDEA (indicateurs de durabilité des exploitations agricoles) : une démarche pédagogique, *Ingénieries* 25, 29-39.
- Cabidoche Y. M., 2001. *les DOM insulaires : des milieux tropicaux contrastés, des climats et des sols variés sur de courtes distances*. Cours de DEA, Université Antilles Guyane, 7p.
- Cabidoche Y.-M., Cattan P., Dorel M., Paillat J.-M. 2003. *Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués*. S. Marlet, P. Ruelle (éds), "Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation". Actes du séminaire, mai 2002, Montpellier, France. Cirad, Montpellier, France, Colloques, CDROM.
- Castoldi N., Bechini L., 2009. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy, in press, *European Journal of Agronomy*, 14p.
- Champion J., 1963. *Le Bananier*. Paris: G.-P. Maisonneuve & Larose.
- COMITRE, V. Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto – SP. 1993. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993. in CAMPOS, A. T. (Docente) : Balanço energético e sustentabilidade na produção de silagem de milho; 2004; Congresso; V ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA; NIPE/SBEA/UNICAMP; Português; UNICAMP; Campinas; BR; Meio digital; <http://www.unicamp.br/nipe/agrenergd2004>.
- Dulcire M., Cattan P., 2002. Monoculture d'exportation et développement agricole durable : cas de la banane en Guadeloupe. *Cahiers Agricultures*, 11 (5), 313-321.
- Espinosa A., Harnden R., Walker J., 2008. A complexity approach to sustainability – Stafford Beer revisited, *European Journal of Operational Research*, 187 (2), 636-651.
- Ewert F., van Ittersum M., Bezlepina I., Therond O.d, Andersen E., Belhouchette H., Bockstaller C., Brouwer F., Heckelei T., Janssen S., Knapen R., Kuiper M., Louhichi K., Alkan Olsson J., Turpin N, Wery J., Wien J.E., Wolf J., 2009. A methodology for enhanced flexibility of integrated assessment in agriculture, in press, *Environmental Science & Policy*, 16p.
- Ferraro JR LA Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade. Piracicaba, 1999. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de

- São Paulo. In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Scientia Agricola*, 2 (1), p.1-7.
- Fluck RC, Baird CD. Agricultural energetics. Gainesville: University of Florida, 1982. In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Scientia Agricola*, 2 (1), p.1-7.
- Girardin, P., Bockstaller, C., van der Werf, H.M.G., 1999. Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture* 13, 5–21.
- Gras, R., Benoit, M., Deffontaines, J., Duru, M., Lafarge, M., Langlet, A., et al. (1989). *Le Fait Technique en Agronomie. Activité Agricole, Concepts et Méthodes d'Etudes*, Institut National de la Recherche Agronomique, L'Hamarttan, Paris, France, 184p.
- Häni F., Braga F., Stämpfli A., Keller T., Fischer M., Porsche H., 2003. Rise, a Tool for Holistic Sustainability Assessment at the Farm Level, *International Food and Agribusiness Management Review*, 6 (4), 78-90.
- Hansen J.W., 1996. Is agricultural sustainability a useful concept? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 50, 117–143.
- Harwood, R. R. (1990). A history of sustainable agriculture. In *Sustainable Agricultural Systems*, eds C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller & G. House. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, pp. 3-19. In Hansen J.W., 1996. Is agricultural sustainability a useful concept? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 50, 117–143.
- Hayashi K., 1998. Multicriteria aid for agricultural decisions using preference relations: methodology and application, *Agricultural Systems*, 58 (4), 483-503.
- Ikerd J.E., 1993. The need for a systems approach to sustainable agriculture, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46, 147–160.
- INRA, Novembre 2008. Un outil pour l'analyse de la durabilité des systèmes de culture – Présentation générale et principes d'utilisation (Manuel d'utilisation de MASC). Communication personnelle.
- Institut d'Émission des Départements d'Outre-Mer (IEDOM), 2008. Rapport annuel 2007, IEDOM, Paris, 260p. [en ligne]. Format PDF. Disponible sur http://www.iedom.fr/doc/RA2007_Guadeloupe.pdf
- Jereb et al., 2003 Jereb, E., Bohanec, M., Rajkovič, V., 2003. Computer programme for multi-attribute decision making support. User Manual. Moderna organizacija, Kranj (in Slovene). In Bohanec, M., Džeroski, S., Žnidaršič, M., Messéan, A., Scatista, S., Wesseler, J., 2004: Multi-attribute modeling of economic and ecological impacts of cropping systems, *Informatica* 28, 387-392.
- Meul M., Van Passel S., Nevens F., Dessein J., Rogge E., Mulier A., Van Hauwermeiren A., 2008. MOTIFS: a monitoring tool for integrated farm sustainability, *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 321–332.
- Moraes (de), J. F., 2007. Comparativo entre equações da ASAE para determinação de consumo de combustível e valores reais de campo. *Engenharia Agrícola*, 2007. [en ligne]. Format PDF. [consulté le 29 juin 2009] Disponible sur http://www.engenhariaagricola.ueg.br/arquivos_download/tcc/tcc_2007-2/COMPARATIVO%20ENTRE%20EQUA.pdf

- Munda G., Nijkamp P., Rietveld P., 1994. Qualitative multicriteria evaluation for environmental management, *Ecol. Econ.* 10, 97–112
- Nardo M., Saltelli A., Saisana M., Tarantola S., 2005. "Tools for Composite Indicator building," EUR 21682 EN, European Commission. [consulté le 17 avril], disponible sur <http://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/Document/EUR%2021682%20EN_Tools_for_Composite_Indicator_Building.pdf>
- Nijaguna Bt, Biogas Technology, 2006. Ed, New Age International Ltd, 304p.
- Office de Développement de l'Economie Agricole d'Outre-Mer (ODEADOM). Programme sectoriel banane « **Plan banane durable** » Guadeloupe – Martinique 2008-2013, 260p. [en ligne]. Format PDF. Disponible sur <<http://www.odeadom.fr/wp-content/uploads/2009/03/20090309091801.pdf>>
- Office de Développement de l'Economie Agricole d'Outre-Mer (ODEADOM), 2006. Plaquette filière banane. [en ligne]. Format PDF. [consultée le 13 mai 2009] Disponible sur <http://www.odeadom.fr/wp-content/uploads/2007/01/depliant_banane.pdf>
- Office de Développement de l'Economie Agricole d'Outre-Mer (ODEADOM), 2009. Plaquette filière banane. [en ligne]. Format PDF. [consultée le 13 mai 2009] Disponible sur http://www.odeadom.fr/wp-content/uploads/2009/02/plaquette-banane-bat-06_02_2009.pdf
- Pacheco, E.P., 2000. Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas Rio Branco: Embrapa Acre, 58, 21p.
- PACHECO, Edson Patto. Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas. Rio Branco – AC. Embrapa Acre. Documento, 58, 2000. 21 p. in Moraes (de), J. F., 2007. Comparativo entre equações da ASAE para determinação de consumo de combustível e valores reais de campo. Engenharia Agrícola. [en ligne]. Format PDF. [consulté le 29 juin 2009] Disponible sur http://www.engenhariaagricola.ueg.br/arquivos_download/tcc/tcc_2007-2/COMPARATIVO%20ENTRE%20EQUA.pdf
- Pellizzi G., 1992. Use of energy and labour in Italian agriculture. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 52 (2), 111-119. In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Scientia Agricola*, 2 (1), p.1-7.
- Pimentel D. Handbook of energy utilization in agriculture Boca Raton: CRC Press. 1980. In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Scientia Agricola*, vol.2, n°1, p.1-7.
- Proctor W., Qureshi E., 2005. Multi-criteria evaluation revisited. Conference proceedings: ecological economics in action, Australia New Zealand Society for Ecological Economics. Massey University, Palmerston North, New Zealand, 167-179.
- Quénéhervé, P., Salmon, F., Topart, P., Horry, J.-P., 2009. Nematode Resistance in Bananas: screening results on some new Mycosphaerella resistant banana hybrids. *Euphytica*, 165 (1), Number 1, 137-143
- Rigby D., Cáceres D., 2001. Organic farming and the sustainability of agricultural systems, *Agricultural Systems* 68, 21-40.
- Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Scientia Agricola*, 2 (1), p.1-7.

- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 163-174.
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messéan A., Doré T., 2009. MASC : a qualitative multi attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Accepté à Agronomy for Sustainable Development*.
- Schaller N., 1993. The concept of agricultural sustainability, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46, 89–97.
- Sebillotte M. *Some concepts for analysing framing and cropping systems and for understanding their different effects*. Proceedings of first congress of the European Society of Agronomy, Paris. 1990.
- SERRA, G.E.; HEEZEN, A.M.; MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979. 86p. *In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. Scientia Agricola, vol.2, n°1, p.1-7*
- Sierra G., Fontaine S. and Desfontaine L., Factors controlling N mineralization, nitrification and nitrogen losses in an Oxisol amended with sewage sludge, *Aust. J. Soil Res.* 39 (2001), pp. 519–534.
- SOLAGRO, feuille de calcul indicateur PLANETE, version janv2008. Communication personnelle.
- Sustainable Agriculture Initiative disponible à <<http://www.saipatform.org/>>
- Thieuleux L., 2006. Biodisponibilité de l'azote en cultures bananière sur nitisol, application à la gestion de la fertilisation azotée. Th Doctorat, Université Antilles Guyane, Pointe-à-Pitre. 216p.
- Tixier, P., 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de cultures durables, application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Th Doctorat, ENSAM, Montpellier, France, 233 p.
- Tixier, P.; Malezieux, E.; Dorel, M.; Bockstaller, C.; Girardin, P., 2007. Rpest an indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution: application to banana-based cropping systems. *European Journal of Agronomy* 26, 71-81.
- Ulbanere RC, Ferreira WA. Análise do balanço energético para a produção de milho no Estado de São Paulo. *Engenharia Agrícola* 1989; 4(2):35-42. *In Romanelli Thiago Libório and Milan Marcos, 2005. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. Scientia Agricola, 2 (1), p.1-7.*
- Van Cauwenbergh N., Biala K., Biolders C., Brouckaert V., Franchois L., Garcia Ciudad V., Hermy M., Mathijs E., Muys B., Reijnders J., Sauvenier X., Valecx J., Vanclooster M., Van der Veken B., Wauters E., Peeters A., 2007. SAFE—A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120, 229–242.
- van der Werf H., Lopez-Ridaura S., 2008. Les étapes de l'évaluation multicritère des agrosystèmes. Démarches et méthodes pour l'évaluation multicritères de la durabilité des systèmes d'élevage et de culture. Diaporama, Communication Personnelle, 51 diapositives.
- Van Ittersum M., Ewert F., Heckeley T., Wery J., Alkan Olsson J., Andersen E., Bezlepikina I., Brouwer F., Donatelli M., Flichman G., Olsson L., Rizzoli A., van der Wal T., Wien J.E., Wolf J., 2008. Integrated

assessment of agricultural systems – A component-based framework for the European Union (SEAMLESS), *Agricultural Systems* 96, 150-165.

Von Wirén-Lehr S., 2001. Sustainability in agriculture – an evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 84, 115–129. *In*: Meul M., Van Passel S., Nevens F., Dessein J., Rogge1 E., Mulier A., Van Hauwermeiren A., 2008.

MOTIFS: a monitoring tool for integrated farm sustainability, *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 321–332.

White and Taiganides, 1971 R.K. White and E.P. Taiganides, Pyrolysis of livestock manure, livestock manure management, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Livestock Manure*, ASAE St. Joseph, MI (1971) pp. 190–191, 194. *In* Kaltsas et al., 2007 A.M. Kaltsas, A.P. Mamolos, C.A.

Tsatsarelis, G.D. Nanos and K.L. Kalburtji, Energy budget in organic and conventional olive groves, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122 (2) (2007), pp. 243–251

World Commission on Environment and Development (WCED), 1987. *Our Common Future. The Brundtland Report*. [consulté le 15 avril 2009] Disponible sur : <http://www.worldinbalance.net/agreements/1987-brundtland.php>

ANNEXES

Table des annexes

ANNEXES	63
ANNEXE 1 : Description et objectifs agro-écologiques des innovations	64
ANNEXE 2 : Photos d'éléments des systèmes innovants	67
ANNEXE 3 : Adaptation du mode calcul ou d'évaluation des critères	71
ANNEXE 4 – Détail du mode de calculs de critères	76
ANNEXE 5 : Signification des classes qualitatives	84

ANNEXE I : Description et objectifs agro-écologiques des innovations

Type d'innovation	N°	Description	Réduction des traitements nématocides	Réduction des traitements herbicides	Réduction des traitements fongicides	Réduction des apports d'engrais	Contrôle naturel de la population nématodes	Contrôle naturel des adventices	Fixation d'azote	Tolérance aux nématodes et champignons
Suspension de l'utilisation de pesticides	1	Arrêt des traitements nématocides	X							
	2	Arrêt des traitements herbicides (passage à du désherbage manuel ou mécanique)		X						
	3	Arrêt des traitements nématocides et interdiction herbicides (passage à du désherbage manuel ou mécanique)	X	X						
Adoption de rotation	4	Introduction <i>Crotalaria juncea</i> (8 mois)	X				X		X	
	5	Introduction jachère spontanée contrôlée chimiquement (12 mois)	X				X			
	6	Introduction Ananas (24 mois)	X				X			
Adoption de systèmes intégrés	7	Système intégré 1 (plaine) : rotation avec <i>Brachiaria decumbens</i> (12 mois) + SCVV + culture associée <i>B. decumbens</i>	X	X			X	X		
	8	Système intégré 2 (montagne) : rotation avec jachère contrôlée chimiquement (12 mois) + culture associée <i>Impatiens</i> sp.	X	X			X	X		
	9	Système biologique : rotation avec <i>C. juncea</i> + culture associée <i>Canavalia ensiformis</i> + apport fertilisation organique	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 1-a. Description et objectifs des innovations
 SCVV : Semis sous Couvert Végétal Vivant)

Type d'innovation	N°	Description	Réduction des traitements nématocides	Réduction des traitements herbicides	Réduction des traitements fongicides	Réduction des apports d'engrais	Contrôle naturel de la population nématodes	Contrôle naturel des adventices	Fixation d'azote	Tolérance aux nématodes et champignons
Adoption de cultures associées	10	Culture associée <i>C. ensiformis</i>		X		X		X	X	
	11	Culture associée <i>B. decumbens</i>		X				X		
	12	Culture associée <i>Impatiens</i> sp.		X				X		
Raisonnement des apports	13	Traitement nématocides fonction d'un monitoring de nématodes	X							
	14	Traitement herbicide fonction d'un seuil de couverture du sol en adventices		X						
	15	Apports de fertilisants chimiques en fonction des besoins				X				
Adoption de nouvelles variétés	16	Variété 91X	X		X					X
	17	Variété 91Y	X		X					X
	18	Variété 91Y en système biologique rotation avec <i>C. juncea</i> + culture associée <i>Canavalia ensiformis</i> + apport fertilisation organique	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 1-b. Description et objectifs des innovations (suite)

ANNEXE II : Photos d'éléments des systèmes innovants



Parcelle d'ananas bouteille

(Dupuy, Baie-Mahault ; source : Manuel du planteur d'ananas Bouteille en Guadeloupe CIRAD, 2004)



Parcelle de *Crotalaria juncea*

(Source : www.mfrural.com.br et www.tropicalforages.info)



Jachère de *Brachiaria decumbens*
Expérimentation chez un planteur (Martinique)



Jachère contrôlée chimiquement
Innovation pratiquée chez un planteur. La jachère est à gauche et la bananeraie à droite



Culture associée de *Canavalia ensiformis*
Expérimentation au domaine de Duclos (INRA) et chez un planteur



Culture associée de *Brachiaria decumbens*
Expérimentation chez un planteur (Martinique)



Culture associée d'*Impatiens* sp.
Bananeraie d'altitude (Guadeloupe)

ANNEXE III : Adaptation du mode de calcul ou d'évaluation des critères

Critère	MASC		MASC-Banane		
	Description / Mode de calcul ou d'évaluation		Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Commentaires	Origine des données
Rentabilité	$MSN = \sum_{i=1}^n (PB_i + AD_i - CO_i)$	MSN : Marge Semi-Nette (€/ha/an) PB : Produit Brut (€/ha) AD : Aides Directes (€/ha) CO : Charges Opérationnelles (€/ha) n : nombre d'années de la rotation i : année	MN : Marge Nette (€/ha/an)	Donnée moyenne Sortie de BANAD	BANAD
Indépendance économique	$IND = \sum_{i=1}^n [(1 - AD_i/MSN_i) \times 100]$	IND : Indépendance économique (%)	$IND = (1 - AD/MN) \times 100$	Données moyennes	BANAD
Efficience économique	$EFF = \sum_{i=1}^n [(1 - CO_i/(PB_i + AD_i)) \times 100] / n$	EFF : Efficience économique (%)	$EFF = [1 - CO/(PB + AD)] \times 100$	Données moyennes	BANAD
Besoin en matériel spécifique	Estimation qualitative par expertise		Estimation qualitative		Bibliographie
Contribution à l'emploi	$EMP = [\sum_{i=1}^n (NT_i/S)] / n$	EMP: Nombre d'UTH/ha/an NT : nombre d'UTH extérieur à l'exploitation S : surface du système de culture (ha)	Nombre d'UTH requis (UTH/ha/an)	Donnée moyenne Sortie de BANAD	BANAD
Pénibilité du travail	Estimation qualitative par expertise sur les vibrations de basse et moyenne fréquence, la manutention manuelle de charges lourdes, les allergies, les travaux bruyants, les opérations répétitives		Estimation qualitative sur le nombre d'opérations répétitives et manuelles, et le temps de travail (conditions climatiques)		Expert
Nb cultures différentes dans la rotation	NCD/n	NCD : nombre de cultures différentes sur la durée de la rotation	Pas de changement Une culture sans intérêt économique (culture intermédiaire) compte 0,5 point Une culture d'intérêt menée en association avec une autre culture sans intérêt économique compte pour 1,25 points.		

Tableau 1.a. Résumé de l'adaptation du mode de calcul ou d'évaluation des critères

Critère	MASC		MASC-Banane		
	Description / Mode de calcul ou d'évaluation		Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Commentaires	Origine des données
Nb opérations culturales spécifiques au SdC	$OPE = (\sum_{i=1}^n NO_i)/n$	OPE : nombre d'opérations spécifiques par an NO _i : nombre d'opérations spécifiques pour la culture i	NO _i	Culture semi-pérenne : le résultat du mode de calcul proposé par MASC serait trop faible (division par le nombre d'année de la rotation)	SIMBA, BANAD, Bibliographie
Risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs	$[\sum_{i=1}^n IFT_i]/n$	IFT : Indice de Fréquence de Traitement limité aux produits classés Xn (nocif), T (toxique) et T+ (très toxique). $IFT = \sum_{t=1}^T [(DA_t \times ST_t)/(DH_t \times SP_t)]$ DA: Dose appliqué DH: Dose homologue ST : surface traitée SP : surface de la parcelle T : nombre de traitements sur l'année	Pas de changement		SIMBA
Risque lié aux pesticides dans les eaux	Critère qui agrègeait les critères eaux superficielles et eaux profondes tous deux évalués par les indicateurs eaux superficielles et eaux profondes d'I-Phy de la méthode INDIGO®		Note de risque comprise entre 0 (pas de risque) et 10 (risque maximum) de l'indicateur Rpest du modèle SIMBA	Sortie de SIMBA	SIMBA
Perte de NO3	Indicateur I-NO3 de la méthode INDIGO®		Estimation qualitative		Expert
Perte de P	Expertise dirigée		Estimation qualitative		Expert
Volatilisation de NH3	Indicateur I-NH3 de la méthode INDIGO®		Estimation qualitative		Expert
Emission de N2O	Indicateur I-N2O de la méthode INDIGO®		Estimation qualitative		Expert

Tableau 1.b. Résumé de l'adaptation du mode de calcul ou d'évaluation des critères (suite)

Critère	MASC		MASC-Banane		
	Description / Mode de calcul ou d'évaluation		Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Commentaires	Origine des données
Perte de pesticides dans l'air	Indicateur air d'I-Phy de la méthode INDIGO®		Estimation qualitative		Expert
Fertilité physico-chimique	-		Note de fertilité comprise entre 0 (fertilité nulle) et 10 (fertilité maximale) de l'indicateur Rfert du modèle SIMBA	Sortie de SIMBA	SIMBA
Fertilité phosphorique	Indicateur I-Psol de la méthode INDIGO®		Estimation qualitative par expertise		Expert
Risque érosif	Estimation qualitative par expertise basée sur le status hydrique, le type de couverture et le type de travail du sol		Note de risque comprise entre 0 (pas de risque) et 10 (risque maximum) de l'indicateur Rero du modèle SIMBA	Sortie de SIMBA	SIMBA
Consommation en eau d'irrigation en période critique	$(\sum_{i=1}^n I_{pc_i})/n$	I_{pc_i} : Quantité d'eau par décade par l'irrigation en période critique pour la culture i (mm/an ou m ³ /ha)	Pas de changement	Période critique défini du 1 ^{er} janvier au 30 avril	SIMBA
Demande en eau des cultures de la succession	$(\sum_{i=1}^n ETM_i)/n$	ETM _i : Somme des évapotranspirations pour maximales (ETM) journalières ou décadaires pour la culture i ETM = Kc x ETP ETP : Evapotranspiration potentielle (journalière ou décadaire) Kc : coefficient cultural spécifique	Pas de changement	ETM et ETP hebdomadaires Détails en Annexe IV	SIMBA
Autonomie de la ressource	$(\sum_{i=1}^n I_i)/n$	I_i : quantité d'eau d'irrigation apportée à la culture i	Pas de changement		SIMBA
Consommation en énergie	Indicateur I-EN de la méthode INDIGO®		Estimation quantitative de la consommation énergétique (MJ/ha/an)	Détails en Annexe IV	SIMBA, Bibliographie
Efficacité énergétique	$[\sum_{i=1}^n (EP_i/ET_i)]/n$	EP _i : Energie produite l'année i (MJ/ha/an) ET _i : Energie consommée l'année i (MJ/ha/an)	Pas de changement	Détails en Annexe IV	SIMBA, Bibliographie

Tableau 1.c. Résumé de l'adaptation du mode de calcul ou d'évaluation des critères (suite)

Critère	MASC		MASC-Banane	
	Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Description / Mode de calcul ou d'évaluation	Commentaires
Pression Phosphore	Pmin - Prenouv	Pmin : Quantité annuelle moyenne optimale d'apport de phosphore (kg P ₂ O ₅ /ha/an) déterminée par le logiciel REGIFERT Prenouv : Quantité annuelle moyenne qui peut être apportée sous des formes de phosphore renouvelable	Estimation qualitative	
Diversité des cultures	$1/(\sum_{j=1}^{NC} Pc^2)$	NC : nombre de cultures Pc : proportion de la culture dans la rotation Pc = (nombre d'occurrence de la culture)/(nombre totale d'occurrences de toutes les cultures de la rotation)	$1/[\sum_{j=1}^{NC} [(k_i - a_i) Pc]^2]$ NC : nombre de cultures k _i : coefficient de la culture i a _i : coefficient de la culture associée i Pc : proportion de la culture dans la rotation Pc = (durée de la culture i)/(durée totale de la succession)	Détails en Annexe IV
Proportion traitée de la succession	(NT/NC) x 100	NT : nombre de cycles culturaux avec traitements phytosanitaires dans la succession NC : nombre de cycles culturaux dans la succession	Pas de changement	SIMBA
Insecticides	$[\sum_{i=1}^{n} IFT_i]/n$	IFT uniquement des traitements insecticides	Pas de changement	SIMBA
Fongicides	$[\sum_{i=1}^{n} IFT_i]/n$	IFT uniquement des traitements fongicides	Pas de changement	SIMBA
Herbicides	$[\sum_{i=1}^{n} IFT_i]/n$	IFT uniquement des traitements herbicides	Pas de changement	SIMBA

Tableau 1.d. Résumé de l'adaptation du mode de calcul ou d'évaluation des critères (suite)

ANNEXE IV – Détail du mode de calculs de critères

1. Demande en eau des cultures

Ce critère est évalué par la somme des évapotranspirations maximales (ETM) hebdomadaires. A chaque type de système de culture est attribuée une station météorologique pour les données climatiques :

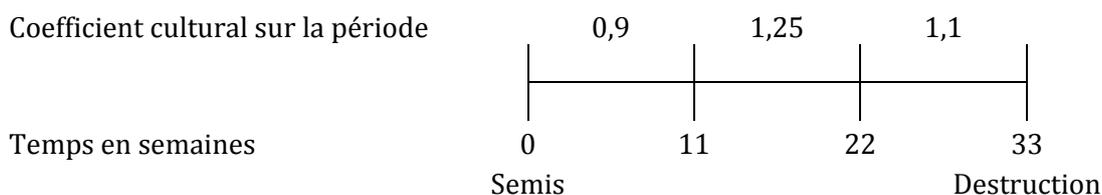
	Précipitations annuelles	Evapotranspiration potentielle annuelle
Type 1	2 614 mm	1 575 mm
Type 2	2 795 mm	1 526 mm
Type 3	2 795 mm	1 526 mm
Type 4	3 542 mm	1 343 mm
Type 5	4 118 mm	1 507 mm
Type 6	4 610 mm	1 103 mm

$$ETM = K_c \times ETP$$

Les coefficients culturaux (K_c) utilisés sont les suivants :

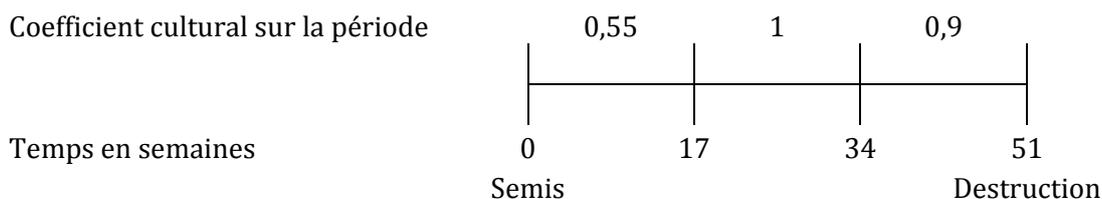
1. *Crotalaria juncea* (Tournebize, com. pers.)

Coefficient cultural sur la période

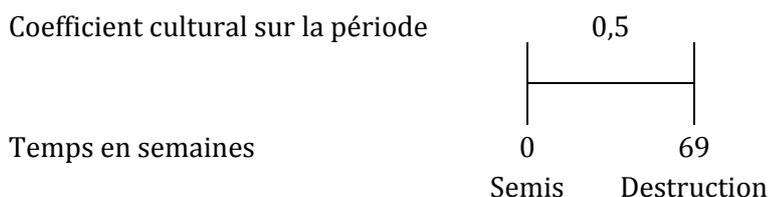


2. *Brachiaria decumbens* (Tournebize, com. pers.)

Coefficient cultural sur la période

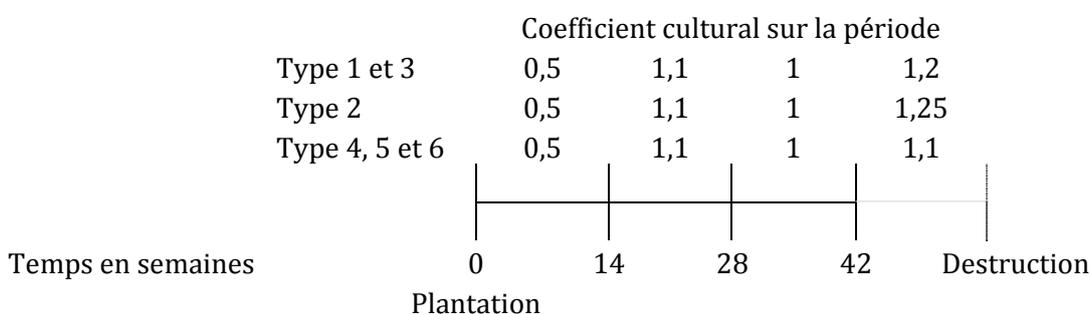


3. Ananas (Allen *et al.*, 1998)



4. La banane

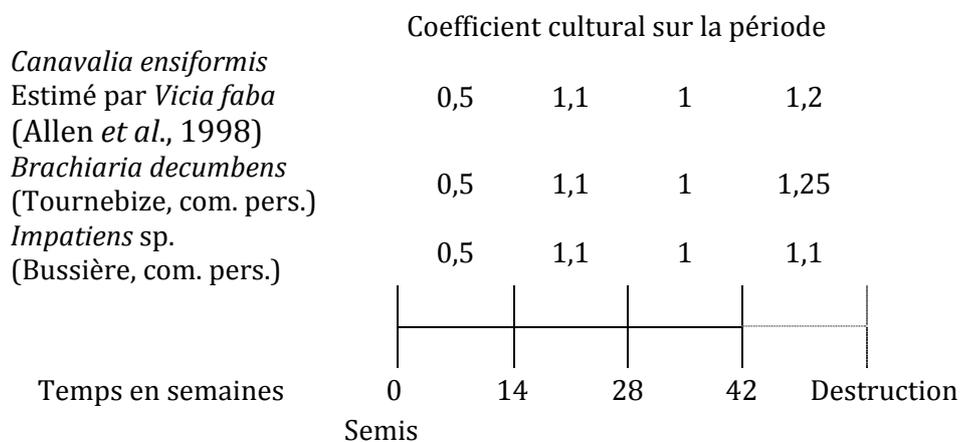
Pour la banane, une différence de coefficient est faite selon le type de sol et donc de système de culture (Allen *et al.*, 1998, document INRA).



5. Les cultures associées

Pour les cultures associées $ETM = ETM(\text{Banane}) + 0,6 \cdot ETM(\text{asso})$ (Tournebize, com. pers.).

Les coefficients culturaux des cultures associées sont les suivants :



2. Diversité des cultures

Pour ce critère, il a été choisi de créer un mode de calcul s'inspirant de celui proposé par MASC afin de prendre en compte les cultures associées. Ainsi :

$$1/[\sum_{j=1}^{NC} [(k_i - a_i) P_c]^2]$$

NC : nombre de cultures

k_i : coefficient de la culture i

a_i : coefficient de la culture associée i

P_c : proportion de la culture dans la rotation

$P_c = (\text{durée de la culture } i) / (\text{durée totale de la succession})$

Pour la banane et l'ananas, $k = 1$

Pour la jachère et les cultures de rotation, $k = 0,5$

De façon générale, les cultures d'intérêt comptent pour 1 point et les cultures de service (interculture) pour 0,5 point comme dans le mode de calcul proposé par MASC.

Pour les cultures associées $a_i = 0,25$

De manière à ce qu'une bananeraie avec une culture associée obtienne une note plus importante qu'une bananeraie en pure.

3. Consommation d'énergie

Ont été pris en compte dans le calcul de la consommation d'énergie :

- la consommation en carburant avec un coefficient énergétique de 34,9 MJ/L (Nijaguna Bt, 2006) pour le super (débroussailleuse) et 38,6 MJ/L pour le diesel (Ulbanere and Ferrira, 1998 *in* Romanelli and Milan, 2005)
- la consommation en lubrifiants avec un coefficient énergétique de 35,94056 MJ/L (Comitre, 1993)
- la consommation en graisse lubrifiante avec un coefficient énergétique de 39,03672 MJ/kg (Comitre, 1993)
- la consommation des produits phytosanitaires avec :
 - Herbicides : coefficient énergétique glyphosate = 454,2 MJ/kg molécule active (Fluck and Baird, 1982)
 - Nématicide : coefficient énergétique fosthiazate = 184,71 MJ/kg molécule active (estimé par celui des insecticides ; Pimentel, 1980 *in* Romanelli and Milan, 2005)
 - Fongicides : coefficient énergétique difénoconazole = 250 MJ/kg molécule active (estimé par celui du tébuconazole ; Manuel Calcul Indicateur INDIGO®, 2007)
 - Traitement d'induction florale en ananas : coefficient énergétique éthéphon = 175 MJ/kg molécule active (estimé à celui d'un régulateur de croissance ; Barber, 2004, *in* Saunders *et al.*, 2006)
- la consommation des engrais avec :
 - Coefficient énergétique azote (N) = 74 MJ/kg (Pellizzi, 1992 *in* Romanelli and Milan, 2005)
 - Coefficient énergétique phosphore (P_2O_5) = 12,56 MJ/kg (Ferraro, 1999 *in* Romanelli and Milan, 2005)

- Coefficient énergétique azote (K_2O) = 6,70 MJ/kg (Ferraro, 1999 *in* Romanelli and Milan, 2005)
- Coefficient énergétique urée = 78,04 MJ/kg (Ferraro, 1999 *in* Romanelli and Milan, 2005)
- la consommation de fertilisants organiques avec un coefficient énergétique pour le guano de 8,4 MJ/kg (estimé par celui du fumier de volaille ; White and Taiganides, 1971 *in* Kaltsas *et al.*, 2007)
- la consommation d'amendements calcaires avec un coefficient énergétique de 1,67 MJ/kg (Ferraro, 1999 *in* Romanelli and Milan, 2005)
- le travail humain avec un coefficient énergétique de 2,2 MJ/heure de travail (Serra *et al.*, 1979 *in* Romanelli and Milan, 2005)
- la dépréciation des machines avec un coefficient énergétique de 68,9 MJ/kg pour les machines motorisées (tracteurs) et de 57,2 MJ/kg pour les machines tirées (outils de travail du sol) (Ulbanere and Ferrira, 1998 *in* Romanelli and Milan, 2005).
- la consommation de semences :
 - *B. decumbens* : coefficient énergétique = 10,5 MJ/kg (estimé par celui des semences de prairie ; Pellizzi, 1992 *in* Romanelli and Milan, 2005)
 - *C. juncea* et *C. ensiformis* : coefficient énergétique = 20 MJ/kg (estimé par celui des semences de cowpea, trèfle et soja ; Pimentel, 1980 *in* Baum *et al.*, 2009)

La consommation en carburant a été déterminée par les équations suivantes :

$$\text{Consommation carburant (L/ha)} = \frac{\text{Conso. tracteur hor. (L/h)}}{\text{Capacité effective au champ (ha/h)}}$$

$$\text{Conso. tracteur hor.} = P_{BT} \times 0,25 \quad (\text{Pacheco, 2000 } *in* \text{ de Moraes, 2007})$$

Conso tracteur hor. : consommation horaire du tracteur (L/h)

P_{BT} : puissance à la barre de traction requise (CV)

La puissance à la barre de traction requise a été déterminée suivant deux méthodes.

Par l'équation suivante :

$$P_{BT} = F [a + b.v + c.v^2].L.P \quad (\text{ASAE D497.5 FEB2006 ; ASABE Standards, 2006})$$

P_{BT} : puissance à la barre de traction requise (kW) (1 CV = 1,361 kW)

F : paramètre sans dimension pour l'ajustement du type de sol (tableau 2)

a, b et c : paramètres spécifique à l'outil (tableau 2)

v : vitesse au champ (km/h)

L : largeur de l'outil (m)

P : profondeur de travail (cm) pour les outils majeurs, 1 (sans dimension) pour les outils mineur

Pour chaque type de système de culture la répartition des types de sol pour l'équation est la suivante : les types 1 à 3 ont un sol argileux et les types 4 à 6 un sol loameux.

Outils	a	b	c	F			Efficacité au champ	Vitesse au champ (km/h)	Durée de vie utile (heures)
				Argileux	Loameux	Sableux			
Tracteurs									
2 roues motrices									12000
Traction avant									12000
4 roues motrices									16000
Chenilles									16000
Outils majeurs									
Charrue	652	0	5,1	1	0,7	0,45	20%	7	2000
Pulvériseur à disques offset 1er travail du sol	364	18,8	0	1	0,88	0,78	16%	7	2000
Pulvériseur à disques offset 2nd travail du sol	254	13,2	0	1	0,88	0,78	8%	7	2000
Cultivateur	91	5,4	0	1	0,85	0,65	15%	5	2000
Billonneuse à disques	185	9,5	0	1	0,88	0,78	25%	7	2000
Sous-soleuse pointe droite	226	0	1,8	1	0,7	0,45	20%	5	2000
Outils mineurs									
Semoir tiré	900	0	0	1	1	1	65%	9	1500
Estimation par les rendements en puissance									
Girrobroyeur 1.80m							80%	11	2000
Epandeur à engrais 1 200L							70%	11	1200
Pulvérisateur porté 8m							65%	10,5	1500
Machine à bêcher							15%	5	2000
Débroussailleuse									1500

Tableau 2. Résumé des paramètres pour le calcul de la consommation de carburant et la dépréciation énergétique (ASABE Standards, 2006)

Par une estimation quand l'équation précédente n'a pas pu être appliquée par manque de données et que l'on disposait d'une des puissances requise pour le travail. Le tableau 3 donne le rendement en puissance en fonction du type de tracteur et des conditions du sol.

Rendement de 90% pour la puissance à la prise de force à partir de la puissance nominale (ASAE D497.5 FEB2006 ; ASABE Standards, 2006).

Type de tracteur	Conditions du sol			
	Dur	Ferme (couvert végétal)	Travaillé	Mou
2 roues motrices	87%	72%	67%	55%
Traction avant	87%	76%	72%	64%
4 roues motrices	88%	77%	75%	70%
Chenilles	88%	76%	74%	72%

Tableau 3. Rendements de la puissance à la barre de traction à partir de la puissance à la prise de force.

La consommation d'une débroussailleuse pour le désherbage manuel a été estimée à 0,88 L/h.

La capacité effective au champ a été déterminée par l'équation suivante :

Capacité effective au champ = $[(L \times v) / (10 \times \text{Nb de passages})] \times \text{Eff}$

Capacité effective au champ (ha/h)

L : largeur de l'outil (m)

v : vitesse moyenne théorique au champ (km/h)

Nb de passages : nombre de passage pour l'opération

Eff : efficacité au champ (%)

Les paramètres sont résumés en tableau 2. L'efficacité au champ a été définie selon les données recueillies sur les temps de travaux lors des enquêtes de la typologie.

La consommation en lubrifiants a été estimée comme suit :

$$C_{\text{lubr}} = 0,00043 \times P + 0,02169 \quad (\text{Krishnan } et \text{ al.}, 1988 \text{ in de Moraes, 2007})$$

C_{lubr} : consommation horaire en lubrifiants (L/h)

P : puissance nominale du tracteur

La débroussailleuse utilise un mélange d'essence et d'huile. La consommation horaire en lubrifiant été estimé à 0,02 L/ha.

Il suffit ensuite de multiplier par la capacité effective au champ pour avoir la consommation à l'hectare.

La consommation en graisse lubrifiante, selon l'équation :

$$C_{gr}(\text{tracteur}) = \text{Capacité effective au champ} \times 0,05 \quad (\text{Pacheco, 2000})$$

$$C_{gr}(\text{outil}) = \text{Capacité effective au champ} \times 0,03 \quad (\text{Pacheco, 2000})$$

$C_{gr}(\text{tracteur})$: consommation en graisse lubrifiante pour le tracteur (kg/ha)

$C_{gr}(\text{outil})$: consommation en graisse lubrifiante pour le tracteur (kg/ha)

La dépréciation énergétique des machines est estimée par l'équation suivante :

$$D_{MM} = (M_{MM} \times \text{coefficient énergétique}) / (\text{Capacité effective au champ} \times DV)$$

$$D_{MT} = (M_{MT} \times \text{coefficient énergétique}) / (\text{Capacité effective au champ} \times DV)$$

(Romanelli and Milan, 2005)

D_{MM} : dépréciation énergétique machine motorisée (MJ/ha)

D_{MT} : dépréciation énergétique machine tirée (MJ/ha)

M_{MM} : masse machine motorisée (kg)

M_{MT} : masse machine tirée (kg)

DV : durée de vie utile machine (heures) (tableau 2)

Une masse moyenne a été utilisée pour les tracteurs (tableau 4).

Puissance nominale CV	Masse en kg	
	4 roues motrices	2 roues motrices
50		2800
60	3200	2900
70	3500	3200
80	3800	3500
90	4400	
100	4900	
110	5100	
120	5300	
130	5500	
140	5700	
150	6000	
160	6250	
170	6500	
180	6750	
200	7000	

Tableau 4. Masse moyenne du tracteur en fonction de sa puissance et de sa traction
(PLANETE ; Solagro, 2008)

4. Efficience énergétique

Elle est estimée par le rapport entre l'énergie produite et l'énergie consommée.

Dans notre cas l'énergie produite correspond à l'énergie contenue dans les bananes et les ananas vendus.

Energie contenue banane = énergie contenue glucides + énergie contenue lipides + énergie contenue protéines

Energie contenue banane = énergie contenue glucides + énergie contenue lipides + énergie contenue protéines

Avec la composition et les coefficients énergétiques suivants :

	Banane	Ananas	Coefficient énergétique
Humidité	74%	85%	
Glucides	0,92 kg/kg de MS	0,93 kg/kg de MS	17 J/kg
Lipides	0,03 kg/kg de MS	0,04 kg/kg de MS	39 J/kg
Protéines	0,05 kg/kg de MS	0,03 kg/kg de MS	24 J/kg

Tableau 5. Valeur nutritive de l'ananas et de la banane et coefficients énergétiques
(MS : matière sèche)

ANNEXE V : Signification des classes qualitatives

Critères basiques	Nombre de classes	Définition des classes		Détermination
Rentabilité	4	très faible faible moyenne <i>élevée</i>	< 1 SMIC [1 ; 1,4[SMIC [1,4 ; 2[SMIC ≥ 2 SMIC	Avis membres de l'équipe
Indépendance économique	3	faible moyenne <i>Elevée</i>	< 0% [0 ; 50[% ≥ 50%	MASC
Effizienz économique	4	très faible faible moyenne <i>élevée</i>	< 0 % [0 ; 5[% [5 ; 22[% ≥ 22 %	Distribution des valeurs
Besoin en matériel spécifique	4	très élevé élevé moyen <i>faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Contribution à l'emploi	3	faible moyenne <i>élevée</i>	< 0,5 UTH/ha/an [0,5 ; 0,69[UTH/ha/an ≥ 0,69 UTH/ha/an	Distribution des valeurs
Pénibilité du travail	4	très élevée élevée moyenne <i>faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Nb cultures différentes dans la rotation	3	élevé moyen <i>faible</i>	≥ 0,25 culture/an [0,14 ; 0,25[culture/an < 0,14 culture/an	Distribution des valeurs
Nb opérations culturales spécifiques au SdC	3	élevé moyen <i>faible</i>	≥ 17 opérations [12 ; 17[opérations < opérations	Distribution des valeurs
Risque de toxicité phytosanitaire pour les travailleurs	4	élevé moyen faible <i>nul</i>	≥ 2,2 doses/an [1 ; 2,2[doses/an]0 ; 1[dose/an = 0	Distribution des valeurs
Perte de pesticides dans les eaux	3	élevé moyen faible	≥ 6,6 [3,3 ; 6,6[< 3,3	Tixier, 2004
Perte de NO3	4	très élevée moyenne à élevée faible à moyenne <i>très faible</i>		Estimation qualitative par expertise

Tableau 1.a. Définition des classes

Critères basiques	Nombre de classes	Définition des classes		Détermination
Perte de P	4	très élevée moyenne à élevée faible à moyenne <i>très faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Volatilisation de NH3	4	très élevée élevée moyenne <i>faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Emission de N2O	4	très élevée élevée moyenne <i>faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Perte de pesticides dans l'air	4	très élevée élevée moyenne <i>faible</i>		Estimation qualitative par expertise
Fertilité physico-chimique	3	défavorable stable <i>acceptable</i>	< 3,3 [3,3 ; 6,6[≥ 6,6	Tixier, 2004
Fertilité phosphorique	3	très défavorable défavorable <i>acceptable</i>		Estimation qualitative par expertise
Risque érosif	3	élevé moyen <i>faible</i>	≥ 6,6 [3,3 ; 6,6[< 3,3	Tixier, 2004
Consommation en eau d'irrigation en période critique	3	élevée moyenne <i>faible</i>	≥ 110 mm/an [80 ; 110[mm/an < 80 mm/an	Distribution des valeurs
Demande en eau des cultures de la succession	3	élevée moyenne <i>faible</i>	≥ 2 000 mm/an [1 300 ; 2 000[mm/an < 1 300 mm/an	Distribution des valeurs
Autonomie de la ressource	3	élevée moyenne <i>faible</i>	≥ 280 mm/an [150 ; 280[mm/an < 150 mm/an	Distribution des valeurs
Consommation en énergie	3	élevée moyenne <i>faible</i>	≥ 41 000 MJ/ha/an [15 500 ; 41 000[MJ/ha/an < 15 500 MJ/ha/an	Distribution des valeurs

Tableau 1.b. Définition des classes (suite)

Critères basiques	Nombre de classes	Définition des classes		Détermination
Efficienc e énergétique	3	faible moyenne élevée	< 4,5 [4,5 ; 8[≥ 8	Distribution des valeurs
Pression Phosphore	3	élevée moyenne faible		Estimation qualitative par expertise
Diversité des cultures	4	très faible faible à moyenne moyenne à élevée élevée	< 1,4 [1,4 ; 2[[2 ; 4[≥ 4	Distribution des valeurs
Proportion traitée de la succession	5	très faible faible moyenne élevée très élevée	< 10% [10 ; 30[% [30 ; 60[% [60 ; 90[% ≥ 90%	PAS DE JUSTIFICATION
Insecticides	3	élevé moyen faible	≥ 1,3 doses/an [0,1 ; 1,3[doses/an < 0,1 doses/an	Distribution des valeurs
Fongicides	3	élevé moyen faible	≥ 4 doses/an [1,3 ; 4[doses/an < 1,3 doses/an	Distribution des valeurs
Herbicides	3	élevé moyen faible	≥ 4 doses/an [1 ; 4[doses/an < 1 dose/an	Distribution des valeurs

Tableau 1.c. Définition des classes (suite)

€/ha/an	Rentabilité			
	très faible	faible	moyenne	élevée
TYPE 1	< 3 003	[3 003 ; 4 204[	[4 204 ; 6 006[	≥ 6 006
TYPE 2	< 1 576	[1 576 ; 2 207 [	[2 207 ; 3 153[	≥ 3 153
TYPE 3	< 154	[153,80 ; 215[	[ 215; 308[	≥ 308
TYPE 4	< 450	[450 ; 631[	[ 631 ; 901[	≥ 901
TYPE 5	< 1 576	[1 576 ; 2 207[	[2 207 ; 3 153[	≥ 3 153
TYPE 6	< 2 552	[2 552 ; 3 531[	[3 531 ; 5 045[	≥ 5 045

Tableau 2. Détail de la signification pour le critère rentabilité