

SOMMAIRE

Liste des figures	11
Liste des tableaux	14
Abréviations	15
Remerciements	17
 INTRODUCTION	 19
 CHAPITRE 1. CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET DÉMARCHE DE LA THÈSE	 23
1.1 Les agrumes dans le monde	23
1.2 Les agrumes en Guadeloupe	25
1.3 Problématique et organisation de la thèse	31
 CHAPITRE 2. UNE MÉTHODOLOGIE DE RECONCEPTION ET D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES	 41
2.1 Introduction	45
2.2 Material and Method: definition of the five steps in the DISCS method	49
2.2.1 Step 1: Diagnosis	49
2.2.2 Step 2: Objectives and prototypes	49
2.2.3 Step 3: Research loop at the experimental station	51
2.2.4 Step 4: Development loop on volunteer farms	51
2.2.5 Step 5: Territory loop	51
2.3 Results of a case study and discussion	53
2.3.1 Step 1-Diagnosis: Comparing farmer's practices to a reference crop management	53
2.3.2 Step 2-Objectives, assessment and prototypes'design	55
2.3.3 Step 3-Research Loop: test and multi-criteri analysis of the experimental prototypes	57
2.3.4 Step 4-Development loop: design of a decision-aid tool for farmers' use	59
2.3.4.1 Spontaneous appropriation	59
2.3.4.2 Design of decision-aid indicator	59

2.4 Discussion	61
2.4.1 Benefits of a participatory approach	61
2.4.2 Providing relevant multifunctional tools	61
2.5 Conclusion	63
 CHAPITRE 3. CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES PRATIQUES CULTURALES BASÉE SUR LA COMPARAISON A UN ITINÉRAIRE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE	 65
3.1 Introduction	69
3.2 Materiel and methods	71
3.2.1 Preliminary farm survey and farm typology	73
3.2.2 Stage 1. Analytical framework of crop management	73
3.2.3 Stage 2. Evaluation of crop management performances	75
3.2.3.1 An indicator for evaluating the state of tree health	75
3.2.3.2 A treatment frequency index for evaluating the level of pesticide use	75
3.2.3.3 Analysis of correlated crop practice performances	75
3.2.4 Stage 3. Collectively building the constraint framework	77
3.2.4.1 Statistically analysing the crop management constraints	77
3.2.4.2. Collective proposals for cropping system improvement	77
3.3 Results	
3.3.1 Stage 1. Analytical framework of crop management	79
3.3.1.1 Defining and comparing observed CCPs with the RCM	79
3.3.1.2 Deviation from the reference crop management...	81
3.3.2 Stage 2. Evaluation of cropping practice performances	83
3.3.2.1 Impacts of cropping practices on tree health	83
3.3.2.2 Impacts of cropping practices on pesticide use	83
3.3.3 Stage 3. Collectively building the constraint framework	85
3.3.3.1 A typology to analyse the cropping system constraints	85
3.3.3.2 Proposal for improvement of the cropping system...	85
3.4 Discussion	87
 CHAPITRE 4. CO-CONSTRUCTION DE PROTOTYPES EXPÉRIMENTAUX DE GESTION DE L'ENHERBEMENT POUR LES VERGERS D'AGRUMES EN GUADELOUPE	 91
4.1. La gestion de l'enherbement en verger	93
4.1.1 Tactiques de gestion des adventices en verger	93
4.1.2 L'enherbement en verger, plantes de services	93

4.2 Choosing cover crops to enhance ecological services in orchards: a multiple criteria and systemic approach applied to tropical areas	99
4.2.1 Introduction	101
4.2.2 Material and method	103
4.2.2.1 Multicriteria grid construction	103
4.2.2.2 Multi criteria grid use	103
4.2.2.3 Guadeloupe experiment	105
4.2.2.4 Martinique experiment	105
4.2.3 Results and discussion	107
4.2.3.1 Step1	107
4.2.3.2 Step2	107
4.2.3.3 Step3	107
4.2.3.4 Selected cover crops	107
4.2.4 Perspectives: Prototyping and cropping system design	109
4.2.5 Conclusion	109
4.3 Co-construction des prototypes de gestion de l'enherbement	113
4.4 Dispositif expérimental	117
4.4.1 Site d'étude	117
4.4.2 Implantation du verger expérimental	117
4.4.3 Implantation du dispositif expérimental	117
4.4.4 Management des pratiques culturales	119
4.4.5 Suivis et observations des prototypes	121
 CHAPITRE 5. INTÉRÊT DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT EN VERGER D'AGRUMES DANS LE CADRE DE LA LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION	 123
5.1 Predicting the nectar provisioning capacity of weeds to beneficial arthropods using an integrative indicator	125
5.1.1 Introduction	127
5.1.2 Material and methods	129
5.1.2.1 Characterization of ground cover vegetation	129
5.1.2.2 Nectar Provisioning Indicator (NPI) construction	131
5.1.2.3 Sensitivity test of indicator	133
5.1.2.4 Field site and experimental treatments	133
5.1.2.5 Evaluation of nectar provisioning	135
5.1.2.6 Statistical analyses	135

5.1.3 Results	137
5.1.3.1 Influence of weed management treatments...	137
5.1.3.2 Nectar Provisioning Indicator (NPI) scores	137
5.1.3.3 Evaluation of nectar provisioning	139
5.1.3.4 Sensitivity test results	139
5.1.4 Discussion	141
5.1.4.1 Impact of weed management on nectar provisioning	141
5.1.4.2 Validation of Nectar Provisioning Indicator	141
5.1.4.3 NPI: a decision aid tool for weed management	143
5.2 Influence of ground cover management on diversity and density of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in Guadeloupean citrus orchards	147
5.2.1 Introduction	149
5.2.2 Material and method	151
5.2.2.1 Site and meteorological conditions	151
5.2.2.2 Treatments	151
5.2.2.3 Sampling, identification and data analysis	153
5.2.3 Results and discussion	155
5.2.3.1 Meteorological survey	155
5.2.3.2 Phytoseiid mite diversity	157
5.2.3.3 Phytoseiid mite density	159
5.2.3.4 Phytoseiid host plants	161
5.2.3.5 Potential of the phytoseiid species as control agents	163
5.2.4 Conclusion	165
CHAPITRE 6. ANALYSE MULTICRITÈRE DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT	167
6.1 Multicriteria assesement of weed management in tropical orchard by means of indicators	169
6.1.1 Introduction	171
6.1.2 Materiel and methods	173
6.1.2.1 Transformation of the improvement objectives into appropriate...	173
6.1.2.2 Selection, adaptation or design of indicators	173
6.1.2.3 Aggregation of the indicators	177
6.1.2.4 Case study: new weed management practices in citrus orchards	179
6.1.3 Results	185
6.1.3.1 Prototype performance indicators	185
6.1.3.2 Environmental risk indicators of each prototype	187
6.1.3.3 Final assesement	189
6.1.3.4 Sensitivity test results	189
6.1.4 Discussion	189

6.2 Rappel et illustration des principales performances des cinq prototypes de gestion de l'enherbement au terme des trois ans	193
 DISCUSSION GÉNÉRALE	 203
1. Surpasser les conflits d'intérêts par un dialogue entre acteurs à chaque étape de la re-conception	203
2. Trois familles d'acteurs, trois référentiels	207
3. Faciliter les échanges d'information en adoptant une démarche d'amélioration continue	207
4. Matérialiser les supports d'échange entre acteurs par trois objets de transfert, produits des boucles de progrès	209
5. Répartir les rôles des acteurs entre deux niveaux d'intervention	211
6. Favoriser des innovations appropriables	211
7. Permettre à chaque acteur d'évaluer ses résultats par rapport à la problématique commune	213
 CONCLUSION	 215
RÉFÉRENCES CITÉES	217
 ANNEXES	 233
RÉSUMÉ	287
SUMMARY	289

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1. CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET DÉMARCHE DE LA THÈSE

Figure 1.1 : Carte de répartition du Huanglongbing.	24
Figure 1.2 : Composition du verger d'agrumes guadeloupéen.	24
Figure 1.3 : Carte de la Guadeloupe.	26
Figure 1.4 : Adulte du charançon des agrumes, <i>Diaprepes abbreviatus</i> .	26
Figure 1.5 : Larves de charançon (<i>Diaprepes</i> sp.).	26
Figure 1.6 : Quelques auxiliaires contribuant à l'équilibre biologique des vergers d'agrumes en Guadeloupe.	28
Figure 1.7 : Démarche de conception des systèmes de culture et positionnement travail de thèse	38

CHAPITRE 2. UNE MÉTHODOLOGIE DE RECONCEPTION ET D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES

Figure 2.1: The DISCS method	50
Figure 2.2: Chronology of the re-design of citrus production using the DISCS method	52
Figure 2.3: Co-building the Labor Conditions indicator	58

CHAPITRE 3. CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES PRATIQUES CULTURALES BASÉE SUR LA COMPARAISON A UN ITINÉRAIRE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE

Figure 3.1: Three stages were necessary to implement our analytical framework.	70
Figure 3.2: Decision tree built following expert advice to determine whether the "cropping conditions" combination of cropping practices is observed or not observed in the case of a plot located in a wet ecological zone.	78
Figure 3.3: Decision tree built following expert advice to determine whether the "cropping conditions" combination of cropping practices is observed or not observed in the case of a plot located in an ecological zone with a marked dry season.	78
Figure 3.4: Decision tree built following expert advice to determine whether the fertilisation component of the "tree management" combination of cropping practices is observed.	80
Figure 3.5: Graphic representation of the multiple correspondence factorial analysis.	80
Figure 3.6: Three-dimensional representation of the multiple correspondence factorial analysis.	82
Figure 3.7: Crop management profiles of producers of groups A and B.	82
Figure 3.8: Constraint framework for citrus cropping system improvement in Guadeloupe.	86

CHAPITRE 4. CO-CONSTRUCTION DE PROTOTYPES EXPÉRIMENTAUX DE GESTION DE L'ENHERBEMENT POUR LES VERGERS D'AGRUMES EN GUADELOUPE

Figure 4.2.1: General approach to select and integrate cover crops in cropping system, applied to orchards in tropical wet area.	100
Figure 4.2.2: Multicriteria selection grid with the detailed screening steps for orchards.	102
Figure 4.2.3: 4 cover crops evaluation in field trial in Guadeloupe.	106
Figure 4.2.4: 24 cover crops assessment with experimental measurements in Martinique.	106
Figure 4.2.5 : Phase d'installation de <i>Neonotonia wightii</i> durant la période d'expérimentation (septembre 2006 à août 2007).	108
Figure 4.3.1 : Prototype PV (Perennial Vegetation).	112
Figure 4.3.2: Prototype GLY.	112
Figure 4.3.3 : AV, enherbement spontané.	114
Figure 4.3.4 : ANeo, enherbement annuel à base d'une 'légumineuse' semée.	114
Figure 4.3.5 : PNeo, enherbement pérenne à base d'une 'légumineuse' semée.	114
Figure 4.4.1 : Dispositif expérimental, chaque parcellaire élémentaire d'une surface de 105 m ² comporte 3 arbres sauf pour le prototype LMV qui n'en comporte aucun.	116
Figure 4.4.2 : dispositif expérimental (janvier 2009), les 30 parcelles élémentaires sont séparées par une haie artificielle d'un mètre de hauteur.	116
Figure 4.4.3 : Capteur de déplacement enregistrant les variations du diamètre du tronc des arbres au cours de la journée.	118

CHAPITRE 5. INTÉRÊT DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT EN VERGER D'AGRUMES DANS LE CADRE DE LA LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION

Figure 5.1.1: A sample calculation of degrees of membership (favourable and unfavourable) for an input variable (Specie Richness) in the fuzzy class (4 to 13 species).	130
Figure 5.1.2: Graphic representation of the multiple correspondence factorial analysis (MCFA).	138
Figure 5.1.3: Sensitivity analysis of the Nectar Provisioning Indicator (NPI).	138
Figure 5.2.1: Temperature and rainfall dynamics at the experimental station from August 2008 to July 2009.	154
Figure 5.2.2: Daily temperature changes, mean temperature and daily amplitude inside the vegetal cover.	154
Figure 5.2.3: Densities of phytoseiid mite species collected from covers between October 2008 and July 2009.	156
Figure 5.2.4: Seasonal densities of phytoseiid mites.	158

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION MULTICRITÈRE DES EFFETS DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT A L'AIDE D'INDICATEURS

Figure 6.1.1: GAP-I decision tree	178
Figure 6.2.1 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'PV'	192
Figure 6.2.2 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'GLY'	194
Figure 6.2.3 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'AV'	196
Figure 6.2.4 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'ANeo'	198
Figure 6.2.5 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'PNeo'	200

CONCLUSION :

Arbre de mots	214
----------------------	------------

ANNEXE (FICHES PLANTES DE SERVICES) : 233

<i>Aeschynomene americana</i>	234
<i>Alysicarpus vaginalis</i>	235
<i>Arachis pintoii</i>	236
<i>Axonopus compressus</i>	237
<i>Brachiaria decumbens</i>	238
<i>Brachiaria humidicola</i>	239
<i>Cajanus cajan</i>	240
<i>Calopogonium mucunoides</i>	241
<i>Canavalia ensiformis</i>	242
<i>Canavalia rosea</i>	243
<i>Centrosema virginianum</i>	244
<i>Chamaecrista diphylla</i>	245
<i>Chamaecrista obcordata</i>	246
<i>Clitoria ternatea</i>	247
<i>Commelina diffusa</i>	248
<i>Crotalaria spp</i>	249
<i>Cynodon dactylon</i>	250
<i>Desmodium adscendens</i>	251
<i>Desmodium axillare</i>	252
<i>Desmodium intortum</i>	253
<i>Desmodium procumbens</i>	254
<i>Desmodium scorpiurus</i>	255
<i>Desmodium tortuosum</i>	256
<i>Desmodium triflorum</i>	257
<i>Digitaria decumbens</i>	258
<i>Echinochloa colona</i>	259
<i>Eleusine indica</i>	260
<i>Indigofera spicata</i>	261

<i>Lablab purpureus</i>	262
<i>Lantana montevidensis</i>	263
<i>Macroptilum atropurpureum</i>	264
<i>Medicago sativa</i>	265
<i>Mucuna pruriens</i>	266
<i>Neonotonia wightii</i>	267
<i>Paspalum notatum</i>	268
<i>Pennisetum purpureum</i>	269
<i>Pueraria phaseoloides</i>	270
<i>Rhynchosia minima</i>	271
<i>Rhynchosia reticulate</i>	272
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	273
<i>Stylosanthes guianensis</i>	274
<i>Stylosanthes hamata</i>	275
<i>Tephrosia cinerea</i>	276
<i>Tephrosia senna</i>	277
<i>Tripogandra serrulata</i>	278
<i>Tripsacrum laxum</i>	279
<i>Vicia hirsuta</i>	280
<i>Vigna hosei</i>	281
<i>Vigna luteola</i>	282
<i>Vigna unguiculata</i>	283
<i>Wedelia trilobata</i>	284
<i>Zebrina pendula</i>	285
<i>Zornia microphylla</i>	286

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2. UNE MÉTHODOLOGIE DE RECONCEPTION ET D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES

Table 2.1: Comparison of the different steps of DISCS with other farming system design methods	44
Table 2.2: Objectives for innovative citrus cropping system (and indicators for assessment)	54
Table 2.3: Characteristics and performance of the five experimental prototypes	56

CHAPITRE 3. CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES PRATIQUES CULTURALES BASÉE SUR LA COMPARAISON A UN ITINÉRAIRE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE

Table 3.1: The three main types of producer identified in the Beauvois (2006) farm typology.	70
Table 3.2: Synthesis of the reference crop management.	72
Table 3.3: Simplification of reference crop management into five logical and ordered combinations of cropping practices.	78

CHAPITRE 4. CO-CONSTRUCTION DE PROTOTYPES EXPÉRIMENTAUX DE GESTION DE L'ENHERBEMENT POUR LES VERGERS D'AGRUMES EN GUADELOUPE

Table 4.2.1: Selected cover crops for orchards in both Guadeloupe and Martinique, end of step 2, in bold common species.	104
Tableau 4.4.1 : Récapitulatif des différentes opérations de gestion de l'enherbement sur les prototypes. ITK (itinéraire technique de référence).	118

CHAPITRE 5. INTÉRÊT DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT EN VERGER D'AGRUMES DANS LE CADRE DE LA LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION

Table 5.1.1: Thresholds allocated to percentage 'Species Richness', 'Ground Cover' and 'Floral score' governing the membership of favourable and unfavourable subsets of nectar provision for nectarivorous biological control agents.	130
Table 5.1.2: Decision rules governing the allocation of Nectar Provisioning Indicator's ranging between 0 and 10.	132
Table 5.1.3: A sample calculation of Sugeno's inference method with Specie Richness.	132
Table 5.1.4: Number of agricultural practices undertaken in the six weed management treatments performed in the citrus orchard trial.	134
Table 5.1.5: The fifteen major plant species and their floral traits observed in the ground cover vegetation of the six weed management treatments performed in the citrus orchard trial.	136
Table 5.1.6: Contribution of the floral traits for beneficial arthropods to the composition of ground cover vegetation in the six weed management treatments.	136
Table 5.2.1: Description of the six ground cover treatments and treatments dates.	150
Table 5.2.2: Phytoseiid mite species found in the whole survey.	156
Table 5.2.3: Simpson's diversity index values in each vegetation cover.	158
Table 5.2.4: Mean ($\pm$ SE) number of phytoseiid mites per treatment.	158
Table 5.2.5: Plant species and associated phytoseiid species.	160
Table 5.2.6: Information about some phytoseiid mites found on citrus orchard grounds.	162

CHAPITRE 6 : EVALUATION MULTICRITÈRE DES EFFETS DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT A L'AIDE D'INDICATEURS

Table 6.1.1: Improvement objectives and evaluation criteria of citrus crops in Guadeloupe	172
Table 6.1.2: Decision rules governing the score allocation of I-PERF	176
Table 6.1.3: Decision rules governing the score allocation of API	176
Table 6.1.4: Inputs per ha	182
Table 6.1.5: Performance of the 5 weed management prototypes	186
Table 6.6.6: Principle variables that contributed to the construction of the indicators API and NPI	186
Table 6.1.7: Final aggregation of indicators in 3 modules of evaluation on a scale of 0 to 10	188

ABRÉVIATIONS

AFRIS : Animal Feed Resources Information
API : Agricultural Practice Impact
ANeo : Annual ground cover with *Neonotonia wightii*
AV : Annual spontaneous Vegetation
ASSOFWI : Association des producteurs de fruits et de cristophines de Guadeloupe
CED : Cumulative energy Demand
CIRAD : Centre de coopération International de recherche Agronomique pour le Développement
DAF : Direction de l'Agriculture et des Forêts
DISCS : An improved method for collectively reDesigning and assessing Innovative Sustainable Cropping Systems
ETP : Evapotranspiration
FAO : Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'agriculture
FAFSEA : Fond national d'Assurance Formation des Salariés des Exploitations et des entreprises Agricoles
FEADER : Fonds européen agricole pour le développement rural
GAP-I : Good Agricultural Practices Indicator
GLY : Glyphosate
IFEN : Institut Français de l'Environnement
IFT (TFI) : Indice de Fréquence de Traitements
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
IPHY : Indicateur d'impacts des produits phytosanitaires sur l'environnement de la méthode Indigo développée par l'INRA
LMV : Late Mowing Vegetation
MNTD : Minimum daily trunk diameter variation
NPI : Nectar Provisioning Indicator
NRC : Natural Resource Consumption
PNeo : Perennial ground cover with *Neonotonia wightii*
PRAM : Pôle Régional d'Agro-écologie de Martinique
PDR : Plan de Développement Régional
PFI : Production Fruitière Intégrée
PV : Perennial spontaneous Vegetation
VIVEA : Fonds pour la formation des entrepreneurs du Vivant

REMERCIEMENTS

Autant vous le dire tout de suite : je ne rechercherai pas de synonyme au verbe remercier, entendez donc tous ces 'remercier' au sens premier : exprimer sa gratitude, dire merci... et ajoutez y tous les superlatifs possibles ! Je vais essayer de remercier les principales personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'aboutissement de ce travail, alors d'avance pardon si je vous ai oublié...

Au préalable, je tiens donc à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail avec un remerciement appuyé aux rapporteurs qui ont su dégager un peu (beaucoup) de leur précieux temps malgré leur calendrier très chargé, merci à Françoise Lescouret et Marianne Lebaill.

Que Magalie Lesueur-Jannoyer, Amadou Bâ, Harry Ozier-Lafontaine et Eric Malézieux soient ici remerciés pour la valeur de leurs conseils qui m'ont permis à chacune de leurs remarques de prendre la distance nécessaire à cette formation.

Ce travail de thèse mené en Guadeloupe parallèlement à mes activités de recherche et développement a été possible grâce au CIRAD et à ses différents responsables malgré une période de restructuration caractérisée par une 'valse' des responsables de programmes, d'unités, de départements... merci donc à Jean-Yves Rey, Hubert De Bon, Jacky Ganry, Eric Malézieux, Robert Habib qui n'ont jamais failli dans leur soutien direct ou indirect.

Ce travail est avant tout un des résultats d'un projet de recherche et développement et celui d'une équipe, celle de la station du CIRAD de Vieux-Habitants en Guadeloupe. Permanents du CIRAD, volontaires à l'aide technique, stagiaires... ils sont donc nombreux à avoir apporté leur pierre à l'édifice, je les remercie tous pour leur motivation à faire avancer notre filière de diversification agricole : Corinne Calabre, Julie Mailloux, Laure de Roffignac, Pauline Dubois, Amélie Rajaud, Fred Vingadassalon, Jérôme Saint Marc dit Emile, Emmanuel Mombrun dit Mano, Franck Marius mais aussi Olivier Damas, Guillaume Boullenger, Max Pfohl...

Que mes collègues du CIRAD qui, à un moment ou à un autre, ont contribué à la formalisation des résultats de mes travaux pour aboutir à la rédaction des articles composant cette thèse, soient ici remerciés et en particulier Muriel Bonin, Claudine Basset-Mens, Cécile Fovet-Rabot, Chantal Loison, Philippe Cattan et Henri Vannière. Merci également à mes autres collègues d'autres institutions qui par leurs connaissances spécifiques m'ont permis d'explorer d'autres domaines de compétence et notamment les indicateurs avec Philippe Girardin et Christian Bockstaller, les phytoseiidae avec Serge Kreiter, l'entomologie avec Jean Etienne et Jean-Pierre Sarthou, la physiologie végétale avec Régis Tournebize...

Enfin, la vie est faite d'opportunités qu'il faut savoir saisir (sans trop réfléchir parfois !), si aujourd'hui je soutiens cette thèse c'est bien parce qu'un jour des hommes ont souhaité partager leurs passions et m'ont donné envie de suivre leur chemin, merci donc à Christian Didier pour m'avoir permis de découvrir ce métier de chercheur pour le développement et à Thierry Goguet de m'avoir transmis la rigueur nécessaire. Que Thierry, bien trop vite parti, trouve dans ce manuscrit le résultat de ses enseignements et encouragements.

Encore merci à tous, Fabrice.

INTRODUCTION

A l'heure du développement durable, les questions posées à la recherche agronomique émergent le plus souvent d'acteurs sociaux : cet acteur (gestionnaire de parcs nationaux, législateur, consommateur...), ni chercheur ni producteur, s'invite sur le champ cultivé et fait valoir un droit de regard, sur les impacts environnementaux et humains des pratiques agricoles, et sur la qualité de la production finale ; charge à l'exploitant agricole de se conformer à des contraintes écologiques et des exigences sociétales en perpétuelle évolution. En écho, le plan national 'Ecophyto 2018'¹, mis en place par le ministère de l'agriculture et de la pêche, a pour objectif d'identifier, de concevoir et de diffuser des systèmes de production économes en intrants, de façon à réduire de 50 % l'usage des pesticides sur le territoire national, à l'horizon 2018. Il s'agit à la fois de réduire l'usage de ces produits et de limiter l'impact de ceux qui resteront indispensables pour protéger les cultures des parasites, des mauvaises herbes et des maladies. Ce plan insiste sur la nécessité de « *réorienter et réactiver le processus d'innovation* » dans le cadre d'un partenariat entre « *tous les acteurs de la recherche et du développement* », condition nécessaire à la mise en œuvre des innovations dans les exploitations agricoles. Ces préoccupations sont une problématique particulièrement sensible aux Antilles où la révélation de la pollution des eaux par la chlordécone (Beaugendre, 2005), organochloré utilisé dans les bananeraies jusqu'en 1993, a accéléré la prise de conscience de l'impact de certaines pratiques agricoles sur l'environnement et la santé (Belpomme, 2007 ; Multiger et al. 2010).

L'agriculture guadeloupéenne repose encore aujourd'hui sur deux piliers : la canne-à-sucre et la banane. Pour l'heure, la banane reste la première production d'exportation et la principale source d'emplois (12 000 emplois directs et indirects) et de revenus agricoles. C'est la première activité agricole avec 21,5 % de la valeur agricole créée en 2003 (Temple *et al.*, 2005). Cependant, depuis quelques années, la production de banane traverse une situation difficile pour des raisons à la fois environnementales et économiques (Bonin *et al.*, 2006). Dans ce contexte, et bien qu'elle demeure une culture minoritaire en Guadeloupe, le développement de la production agrumicole en tant que culture de diversification représente un réel enjeu. D'une part, pour répondre à la demande du marché local déficitaire (notamment en supplantant les importations) et d'autre part, parce qu'elle constitue une alternative intéressante à la culture de la banane. En effet, la sécurité économique, inhérente à la diversification des sources de revenus des exploitants, encourage cette diversification agricole. De plus, la reconversion en agrumes peut offrir une perspective intéressante de valorisation des anciennes bananeraies dont le sol est contaminé par la chlordécone. Ces terres polluées ne peuvent être reconverties ni en culture de tubercules (igname, patate douce...) ni en culture dont la racine est un organe de réserve (oignon, carotte...) car ces produits stockent la molécule et contaminent à leur tour le consommateur. Seuls les légumes 'aériens' et les fruits ne semblent pas concernés par ce transfert de pollution (INVS, 2010).

¹ <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-2018>

D'après le PDR¹ de Guadeloupe, près de 5.000 ha, seraient concernés par cette demande de reconversion, terres qui risquent d'être déclassées compte tenu de la pression qu'exerce l'urbanisme sur les terres agricoles en milieu insulaire (Houdart *et al.*, 2009). Mis à part son impact sur le paysage, ce déclassement des terres agricoles en terrains constructibles ne changerait en rien les risques sanitaires² qu'encourent la population compte tenu de l'attachement des antillais à la valorisation de leur terre par sa mise en culture via 'le jardin créole' – lequel serait probablement largement planté de racines et tubercules traditionnels ! Dans ces conditions, les terres agricoles doivent rester agricoles, les cultures à risque proscrites et les nouvelles cultures accompagnées, d'une part pour 'gérer' au mieux ou en connaissance de cause le risque, et d'autre part pour développer des systèmes de culture durables. C'est dans ce contexte que notre travail de thèse s'est inscrit. Le système de culture agrumicole a servi de modèle d'étude sachant qu'une recherche permanente de généricité a guidé ce travail afin de faciliter à terme sa transposition à d'autres systèmes de culture.

L'objectif appliqué de cette thèse réside dans la contribution à la conception d'un système agrumicole guadeloupéen en réponse aux challenges de développement de systèmes de culture durables ; ceci dans un contexte insulaire où la fragilité des écosystèmes terrestres et marins impose une redéfinition de l'usage des ressources naturelles pour limiter les impacts sur le sol, l'eau, l'énergie, etc.

¹ Plan de Développement Régional Guadeloupe 2007-2013

² « Des études successives ont démontré qu'une partie de la population martiniquaise, estimée à environ 15000 personnes, pouvait par la consommation régulière de légumes cultivés dans les jardins familiaux, dépasser les limites maximales d'exposition à la chloredécone » <http://www.ars.martinique.sante.fr/JAFA-Jardins-Familiaux.93583.0.html>

Rapport-Gratuit.com

CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET DÉMARCHE DE LA THÈSE

1.1 Les agrumes dans le monde

Sous le terme « agrumes » sont regroupées de nombreuses espèces des genres botaniques *Citrus*, *Fortunella* et *Poncirus*, tous membres de la famille des rutacées. Leur origine se situe en Chine, Insulinde et Inde où des traces de leur culture ont été trouvées dès le septième siècle avant J.C. Les échanges commerciaux et conquêtes militaires ont facilité la dispersion des agrumes dans le monde. Elle s'est faite dans un premier temps par la voie terrestre, via l'Asie Mineure et le Moyen-Orient, puis s'est accélérée grâce aux échanges maritimes dès le XVI^{ème} siècle. Les agrumes sont aujourd'hui distribués dans toutes les parties du monde comprises entre l'équateur et des latitudes légèrement supérieures à 40° (Le Bellec & Le Bellec, 2007).

La production mondiale est aujourd'hui estimée à 120 millions de tonnes par an dont 58% seraient autoconsommés, 30 % transformés (en jus) et 'seulement' 12 % feraient l'objet d'échanges internationaux (source FAO). La Chine et le Brésil se partagent équitablement le 1/3 de cette production mondiale, suivi des USA (10 millions de t), de l'Inde et du Mexique (chacun environ 7 millions de t). Une spécialisation géographique s'est opérée en fonction des marchés et débouchés commerciaux. Les produits transformés proviennent principalement des Etats d'Amérique. La Floride fournit ainsi près de 65 % du jus de pomélo du marché mondial, le Brésil 55 % du jus d'orange et l'Argentine 40 % du jus de citron. Les agrumes frais exportés proviennent quant à eux principalement des pays du bassin méditerranéen (Espagne, Egypte et Turquie) et atteignent près de 60 % des exportations mondiales (l'Espagne étant très largement en tête avec 3.6 millions de t). Les autres pays exportateurs sont l'Afrique du Sud et les USA (respectivement 1.2 et 1 million de t) (sources EUROSTAT et FAO). Globalement, le marché mondial des agrumes est dans une phase de 'maturité' voire en crise pour certaines espèces (Imbert, 2009 ; Imbert, 2010 a). Le marché de l'orange (table ou jus) est, par exemple, en pleine saturation ; celui du pomélo en pleine régression. Les petits agrumes (clémentine, mandarine et autres hybrides) dynamisent encore ces exportations mondiales grâce notamment aux nombreuses nouvelles variétés proposées permettant une offre élargie et l'étalement des périodes de commercialisation. Les pays exportateurs misent également sur la traçabilité de la production pour relancer le marché notamment par le respect de normes de production privées ou publiques permettant de différencier les produits pour mieux les valoriser dans les pays à fort pouvoir d'achat (GLOBAL G.A.P, TESCO, FAIRTRADE...) (Imbert, 2010 b).

Les systèmes de culture agrumicoles sont nombreux et étroitement liés aux finalités de la production. Ils varient du très intensif (monoculture irriguée et mécanisée sur plusieurs centaines d'hectares comme au Brésil, en Afrique du Sud, aux USA... où les fruits sont souvent exploités sur place par l'industrie du jus pour l'exportation) au très extensif lorsque ces arbres sont intégrés aux jardins de type créole comme à Haïti ou aux Antilles où les fruits sont autoconsommés ou vendus sur les marchés locaux (Bakry et al., 2002). De domestication ancienne, la culture des agrumes est globalement maîtrisée dans le monde entier, de nombreux référentiels techniques apportant des réponses aux problèmes techniques rencontrés localement (Grisoni, 1993 ; Davies & Albrigo, 1998 ; Jackson, 1990 ; Le Bellec & Le Bellec, 2007).

Figure 1.1 : Carte de répartition du Huanglongbing

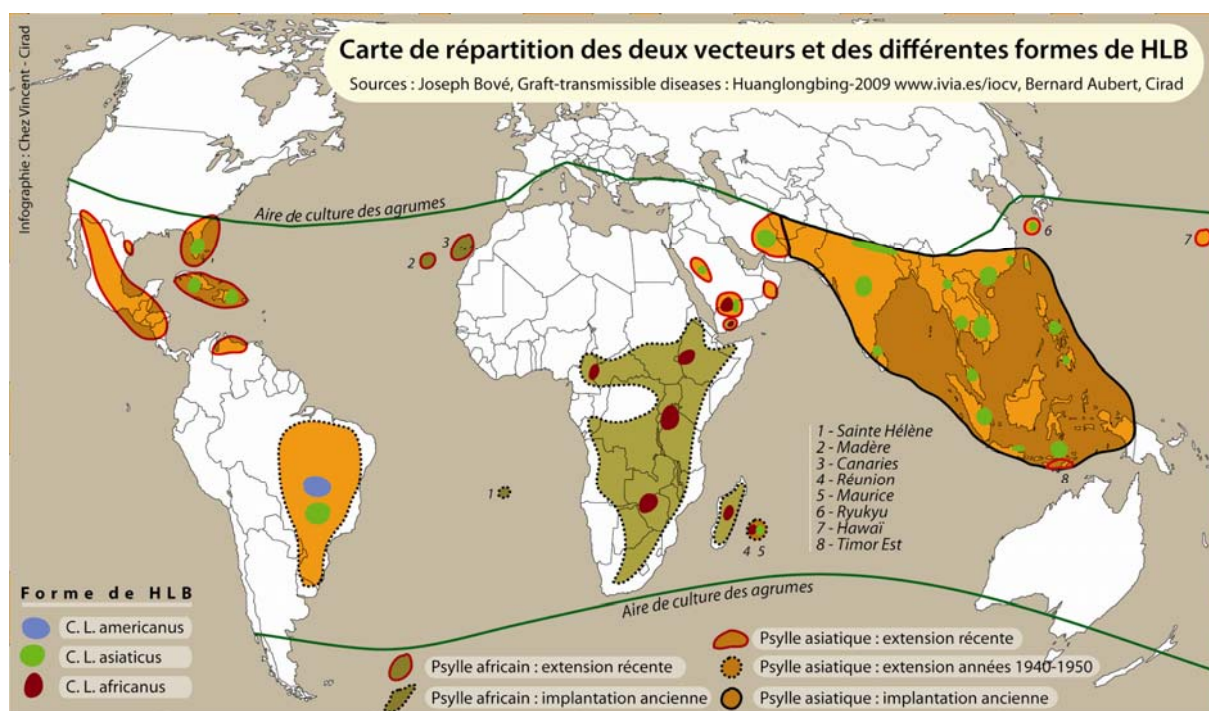
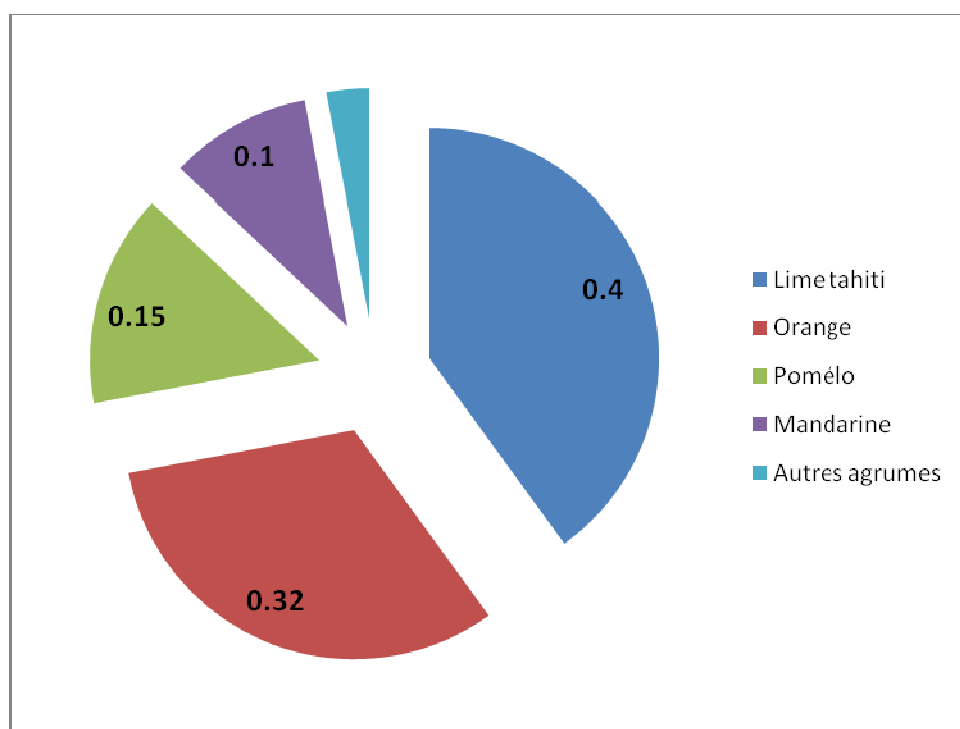


Figure 1.2 : Composition du verger d'agrumes guadeloupéen (source Chambre d'Agriculture, 2008).



Par contre, comme la plupart des systèmes de culture, les agrumes doivent faire face à des enjeux internationaux et particulièrement à des contraintes liées à l'utilisation des ressources aquifères des zones de production (Blinda & Thivet, 2010) et aux pandémies.

Les agrumes sont en effet très exigeants en eau, et surtout à la régularité des apports. Ces besoins sont d'environ 1 500 mm d'eau par an¹. Les forts ensoleillements sont d'autant mieux supportés que l'alimentation hydrique est correctement assurée (Vannière, 2010). Les régions arides ou à pluviométrie mal répartie doivent avoir recours à l'irrigation. Une mise en tension entre ces besoins en eau et les caractéristiques écologiques des principales régions agrumicoles du monde laisse présager des problèmes de gestion des ressources locales en eau (Simmoneaux *et al.*, 2009). Actuellement, dans certaines régions du pourtour méditerranéen, une partie croissante des demandes en eau est satisfaite par une eau « non durable » qui repose sur des prélèvements d'eaux fossiles ou sur une surexploitation des ressources (Blinda & Thivet, 2010). Ces irrigations irraisonnées conduisant parfois au phénomène de salinisation des sols (Pitman & Läuchli, 2002), certains bassins de production citricole (Bassin méditerranéen, Californie, Australie...) sont probablement menacés compte tenu de la sensibilité des agrumes à la salinité (Ait Haddou Mouloud *et al.*, 2002 ; Benyahia *et al.*, 2004). Les problèmes phytosanitaires sur agrumes sont nombreux et plus ou moins graves. Si la plupart des bioagresseurs² sont maîtrisés, au pire par des traitements chimiques, au mieux par des stratégies de lutte biologique (Flint, 1991 ; Etienne *et al.*, 1998 ; Quilici *et al.* 2003), certains d'entre eux compromettent la pérennité même de la culture et/ou les exportations de fruits. Le Huanglongbing (HLB)³, maladie bactérienne en pleine pandémie (Aubert, 2009) qui est un véritable fléau en Asie, a depuis peu gagné le continent américain (figure 1.1), illustre bien les risques qu'encourt cette filière et ce malgré une réglementation contraignante limitant les échanges de matériel végétal et/ou des productions⁴.

1.2 Les agrumes en Guadeloupe

Les agrumes ont été introduits en Guadeloupe au cours du XVI^e siècle depuis Haïti (Le Bellec & Le Bellec, 2004). La production actuelle annuelle avoisine les 6.700 t (données Agreste 2008). La filière agrumes en Guadeloupe a connu en 25 ans un essor important avec un doublement des plantations et une forte augmentation de la production mais elle reste fortement concurrencée par des importations de la zone Caraïbes et d'Amérique centrale. Ces flux d'importation d'environ 4.700 t (données 2009) par an proviennent principalement de la République Dominicaine (51 %), de Cuba (19 %) et de Colombie (15 %). La lime de type Tahiti et l'orange sont aujourd'hui les deux espèces d'agrumes cultivées en Guadeloupe devant le pomélo et la mandarine (figure 1.2).

¹ FAO, 2010 : Crop Water Information: Citrus, http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_citrus.html

² Bioagresseurs : organismes susceptibles de générer des pertes de récoltes directes ou indirectes : pertes de rendement (quantitatif et/ou qualitatif), coût supplémentaire de récolte ou de tri. Les bioagresseurs regroupent, entre autres, les adventices, les insectes, les champignons pathogènes, les virus, les mollusques, les nématodes, etc. (Zadoks, 1993)

³ Huanglongbing : Maladie des agrumes connue aussi sous le nom de greening menant à un dépérissement rapide des arbres. Elle est causée par deux bactéries du phloème (*Liberibacter africanum* et *L. asiaticum*). Outre sa propagation par greffons ou marcottes, cette maladie est disséminée par deux psylles : *Diaphorina citri* d'origine asiatique et *Trioza erytreae* d'origine africaine. Ces deux vecteurs sont très largement répandus dans le monde entier (Aubert, 2009).

⁴ http://europa.eu/legislation_summaries/food_safety/plant_health_checks/f85001_fr.htm

Figure 1.3 : Carte de la Guadeloupe. La zone traditionnelle de culture des agrumes, en Côte Sous-le-Vent, est entourée en rouge. Une partie de cette zone est positionnée sur la zone périphérique du Parc National de Guadeloupe.



Figure 1.4 : Ci-dessous, adulte du charançon des agrumes, *Diaprepes abbreviatus*.



Figure 1.5 : Ci-contre, larves de charançon (*Diaprepes* sp.). Le système racinaire des jeunes arbres (ici un mandarinier) peut être fortement réduit. Les blessures sont alors des portes d'entrée pour des maladies comme le *Phytophthora*.



En terme d'empreinte socio-économique, la production des agrumes occupe 382 ha (données 2008) soit 42 % des superficies dédiées aux cultures fruitières (hors banane). Quasiment toutes les plantations sont situées sur l'île de la Basse-Terre et plus spécifiquement à l'ouest, en Côte Sous-le-Vent (pour 75%) (figure 1.3). L'île de la Basse-Terre se caractérise par une morphologie de relief dissymétrique, avec une topographie pentue à ouest et au sud et de larges plaines littorales au nord et à l'est réservées aux cultures de la canne-à-sucre et au bananier. En conséquence, les vergers d'agrumes sont traditionnellement implantés sur des pentes comprises entre 10 et 50 % et sur des sols très diversifiés dérivés de formations volcaniques anciennes ou récentes (Plaisir *et al.*, 2003). En Côte Sous-le-Vent, le régime pluviométrique est de type tropical humide caractérisé cependant par une période de sécheresse de 3 à 5 mois. Selon l'altitude et les années, la pluviométrie annuelle oscille entre 900 et 1500 mm (moyennes des 10 dernières années). Si la ressource en eau est globalement abondante, cette répartition inégale dans le temps et dans l'espace aboutit, selon les années, à des situations tendues voire de pénurie en fin de saison sèche.

Globalement, les conditions pédo-climatiques de la Basse-Terre sont propices à l'agrumiculture à condition de pourvoir aux déficits hydriques durant les périodes critiques en Côte Sous-le-Vent et, *a contrario*, en Côte Au-Vent ou dans les écologies très humides, d'assurer un bon drainage des parcelles pour limiter les risques de pourriture des racines liée à des phytophthoras (*Phytophthora citrophthora* et/ou *P. parasitica*) (Le Bellec & Le Bellec, 2007). Deux autres principaux bioagresseurs peuvent compromettre la durée de vie des vergers d'agrumes en Guadeloupe. Il s'agit d'un ravageur : le charançon des agrumes (*Diaprepes* spp.) (figure 1.4) et d'une maladie virale : le 'Citrus Tristeza Virus' (CTV).

Les adultes du charançon occasionnent des dégâts secondaires mais typiques sur feuille (bordure de feuille dévorée). Leurs larves, par contre, réalisent leur cycle de développement dans le sol et se nourrissent des racines des arbres (figure 1.5). En cas de forte infestation, l'ensemble du système racinaire des jeunes arbres peut être détruit. Ces dégâts constituent aussi une porte d'entrée privilégiée aux phytophthoras, ce qui conduit alors au dépérissement et à la mort rapide des jeunes arbres. Les arbres plus âgés sont affaiblis et ne meurent que si l'infestation est très forte. La longueur du cycle de développement des *Diaprepes* spp. varie entre 8 et 14 mois (dont seulement 2 à 3 mois au stade adulte). Les nombreuses tentatives de lutte par l'utilisation de produits chimiques ovicides, larvicides, en application foliaire, au sol ont montré une efficacité limitée. Il semblerait que des populations résistantes aient été sélectionnées, et surtout qu'un déséquilibre biologique ait été créé, par élimination des prédateurs et parasitoïdes des *Diaprepes* spp. (Etienne *et al.*, 1998). A ce jour, seul un contrôle biologique semble capable de maintenir les charançons à un niveau bas, et ce de façon durable (Lapointe, 2003). Une lutte biologique avec des nématodes entomopathogènes (*Heterorhabditis indica*) a démarré en 2005 en Guadeloupe et permet, combinée à d'autres moyens de lutte (préservation des auxiliaires notamment), de réduire ces dégâts à des niveaux acceptables (Le Bellec et Mauléon, 2010).

Le CTV a été détecté en 1997 en Guadeloupe (Urbino *et al.*, 2004). Sa propagation a été facilitée par la présence d'un des vecteurs les plus efficaces, le puceron brun des agrumes (*Toxoptera citricida*) (Etienne *et al.*, 1998). Le virus cause une occlusion du phloème au niveau du point de greffe des arbres. Le flux de sève (greffon/porte-greffe) est alors bloqué, causant un rapide déclin de l'arbre. Certaines associations porte-greffes/greffons sont plus sensibles que d'autres.

Figure 1.6 : Quelques auxiliaires contribuant à l'équilibre biologique des vergers d'agrumes en Guadeloupe. De gauche à droite¹, ligne 1 : trois parasitoïdes de la mineuse des agrumes et de cochenilles, ligne 2 : larve et coccinelle, ligne 3 : larve de chrysope, nématode entomopathogène et phytoseiidae, ligne 4 : champignon entomopathogène sur cochenille verte du caféier et adulte de chrysope.



¹ Photos extraites du site <http://caribfruits.cirad.fr>

Par exemple, les symptômes les plus foudroyants sont observés sur les orangers, les mandariniers et les pomelos greffés sur bigaradier (*Citrus aurantium*), porte-greffe longtemps utilisé en Guadeloupe. Les seuls moyens de lutte efficaces contre le CTV résident donc à utiliser des associations porte-greffes/greffons tolérantes (Urbino *et al.*, 2004). La reconversion des vergers guadeloupéens a été opérée (abandon notamment du bigaradier comme porte-greffe) depuis les années 2000. L'ensemble des vergers commerciaux est aujourd'hui planté avec du matériel végétal tolérant ; 2 principaux porte-greffes sont désormais diffusés par les pépiniéristes auprès des producteurs : le *Citrus volkameriana* et le Citrumello 4475 (Le Bellec & Le Bellec, 2007).

Les autres bioagresseurs des agrumes en Guadeloupe sont soit maîtrisés naturellement par les nombreux auxiliaires présents en verger s'ils sont préservés (figure 1.6) (Etienne *et al.*, 1998), soit maîtrisés par des pesticides. Cette lutte chimique est basée sur le déclenchement de traitements phytosanitaires selon des seuils de tolérance qui ont été préalablement déterminés par Etienne *et al.* (1998) et Quilici *et al.* (2003). Ces modes de contrôle ne préjugent pas des pratiques des producteurs mais sont basés sur les connaissances et recommandations actuellement en cours en Guadeloupe (De Roffignac, 2008). Les bioagresseurs soumis à cette protection raisonnée sont, à titre d'exemple, les acariens phytophages (*Phyllocoptruta oleivora*, *Polyphagotarsonemus latus* et *Panonychus citri*), certaines cochenilles (*Fiorina proboscidea* et *Coccus viridis*), les pucerons (*Toxoptera citricida*, *Aphis spiraecola* et *Aphis gossypii*) et les phytophthoras (*P. citrophthora* et *P. parasitica*). Enfin, les adventices occasionnent une pression permanente dans ces agrosystèmes compte tenu des conditions tropicales humides de culture et des difficultés de mécanisation liées à la topographie de la zone de culture principale.

Si les bioagresseurs des systèmes de culture agrumicoles en Guadeloupe semblent aujourd'hui plus ou moins maîtrisés grâce aux différents moyens de lutte mis en œuvre, les équilibres biologiques qui y contribuent restent par définition précaires. Ces équilibres sont le résultat de travaux de recherche & développement engagés depuis la fin des années 1990 (Etienne *et al.*, 1998) et poursuivis jusqu'alors (de Roffignac, 2008 ; Le Bellec & Mauléon, 2010) sur le développement de moyens de lutte raisonnée ou biologique en verger. Les exemples de lutte sont nombreux comme par exemple celui contre la cochenille de l'hibiscus (*Maconellicoccus hirsutus*) via une coccinelle (*Cryptolaemus montrouzieri*) et un parasitoïde (*Anagyrus kamali*) (Etienne, 1999) ou encore contre les psylles vecteurs du Huanglongbing (HLB) des agrumes via un autre parasitoïde (*Tamarixia radiata*) (Aubert, 2009). Mais qu'advierait-il en cas de déséquilibre biologique si les ennemis naturels n'assuraient plus leur rôle et plus particulièrement dans le cas du HLB, pandémie si proche des Antilles ? Les agrumiculteurs guadeloupéens ont bien intégré ces risques puisque les producteurs de l'ASSOFWI¹, la principale organisation professionnelle fédérant cette filière, se sont engagés dans une démarche de production fruitière intégrée (PFI)² depuis déjà plusieurs années (Le Bellec *et al.*, 2005).

¹ ASSOFWI : Association des producteurs de fruits et de cristophines de Guadeloupe.

² PFI : La production fruitière intégrée, définie, en 1997, par l'OILB (Organisation Internationale pour la Lutte Biologique), comme étant : « un système de production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires et l'utilisation de produits agrochimiques, afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine ».

Cet engagement des producteurs d'agrumes de Guadeloupe fait également écho aux objectifs de développement du Parc National de Guadeloupe (PNG) dont une grande partie de la Côte Sous-le-Vent (communes de Vieux-Habitants, de Bouillante et de Pointe-Noire) constitue la zone périphérique du cœur du PNG (figure 1.3) et dans laquelle ce gestionnaire souhaite promouvoir des pratiques agro-écologiques pour les systèmes de production présents sur ce territoire (Graux *et al.*, 2009) en soutenant « *une agriculture paysanne professionnelle diversifiée et de haute qualité et accompagner les exploitants dans leurs efforts de réduction des impacts environnementaux*¹ ».

1.3 Problématique et organisation de la thèse

Objectifs régionaux de développement, objectifs nationaux de réduction des intrants chimiques (plan Ecophyto 2018), crise de confiance des consommateurs face à la production agricole liée à des pollutions anciennes (Chlordécone)... les producteurs sont de plus en plus fortement soumis à des pressions visant à les engager dans la mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement. Ce contexte a orienté les politiques publiques de ces dernières années (les mesures agri-environnementales (MAE) par exemple), les institutions ont déployé des mesures réglementaires, coercitives, incitatives ou encore pédagogiques pour une amélioration des pratiques, répondant mieux à la protection et/ou à la préservation des ressources naturelles (Busca, 2004). Mais le constat est unanime, ces politiques sont jugées insuffisantes pour pérenniser des pratiques culturelles durables sur les exploitations (Dulcire *et al.*, 2006 ; Daré *et al.*, 2009) et ceci peut s'expliquer en partie par un décalage entre ce que propose les institutions en terme d'innovation (ou évolution technologique) et ce que les producteurs veulent ou mettent en œuvre (Houdart *et al.*, 2009). Le schéma 'top down'² du transfert des innovations est par ailleurs remis en cause, un des moyens d'y pallier semble être d'impliquer très précocement les acteurs dans les démarches d'innovation et/ou de conception de système de culture répondant aux objectifs du développement durable (Marttunen and Suomalainen, 2005 ; Etienne *et al.*, 2008 ; Nordstrom *et al.*, 2010). Mais comment proposer à l'échelle de l'unité de décision de l'activité agricole (la parcelle), des solutions à des objectifs formulés désormais à l'échelle du groupe social ou du paysage (Landais, 1998 ; Papy & Baudry, 2002) ?

Concevoir un système de culture pour respecter ces enjeux devient pour de nombreux producteurs une nécessité, soit sous la contrainte sociétale ou soit pour répondre à de nouveaux standards de production issus de législateurs nationaux, internationaux ou de firmes commerciales (Haverkort *et al.*, 2008). Quelle que soit l'origine de la demande (ou moteur) de changement, chercher à améliorer une pratique ou un système de culture résulte souvent d'un processus d'innovation. La conception peut être définie comme un processus actif, intentionnel, qui vise à générer simultanément des concepts et des connaissances qui déboucheront éventuellement sur de nouveaux produits et de nouvelles technologies (Meynard *et al.*, 2006).

¹ <http://www.guadeloupe-parcnational.fr/?La-concertation-degage-deux>

² 'Les chercheurs innovent, les agriculteurs appliquent'.

Rapport-Gratuit.com

La conception est un acte explicite de changement souhaité par un ou plusieurs acteurs, la conception comprend trois phases indispensables : i) la réalisation d'un diagnostic permettant de déterminer les contraintes et les objectifs du système de culture à améliorer, ii) la génération de systèmes de culture innovants en réponse à cette première étape et iii) l'évaluation de ces nouveaux systèmes de culture (Loyce & Wery, 2006 ; Bellon *et al.*, 2007). Ces trois phases aboutissent à la conception de systèmes '*potentiellement innovants*' qui doivent ensuite faire l'objet de tests et d'adaptation en partenariat avec les acteurs. La tendance actuelle est d'impliquer davantage ces acteurs pour favoriser l'adoption de l'innovation (Loyce & Wery, 2006). Loyce et Wery (2006) ont classé les méthodologies de conception des systèmes de culture selon trois approches : concevoir à partir d'un diagnostic agronomique, concevoir à partir de modèles et concevoir à partir de dires d'expert (le prototypage). En réalité, les frontières entre ces méthodes sont théoriques, leur appartenance à telle ou telle méthode dépend plutôt des outils ou des moyens de conception des systèmes de culture mobilisés (type d'expérimentation, modélisation, recherche participative...) et du niveau d'implication des acteurs.

Même si le diagnostic agronomique constitue la base de l'amélioration des systèmes de culture, les méthodes de conception développées à ce jour ne l'inclut pas toujours (Loyce et Wery, 2006). Le considérer dès les premiers instants permet pourtant d'identifier précisément les facteurs limitants des performances du système de culture notamment par une mise en relation des contraintes du système avec les caractéristiques du milieu. Concevoir à partir d'un diagnostic agronomique engendre cependant des dispositifs d'enquête lourds à mettre en œuvre conduisant souvent à une étude limitée dans le temps (nombre d'année, nombre de cycles de culture réduits...) limitant ainsi l'étude de la variabilité climatique et celle des facteurs qui y sont associés (les maladies par exemple). Ces contraintes conduisent souvent à une restriction de la zone enquêtée et/ou à un focus sur une technique culturale par exemple. Concevoir à partir d'un diagnostic nécessite donc de s'appuyer sur des connaissances complémentaires expertes.

'Il n'existe pas d'exemple où un modèle seul a conduit à l'élaboration d'un système innovant, par contre il en existe de nombreux où le modèle a constitué un élément essentiel dans la mise au point de systèmes innovants' (Loyce & Wery, 2006). Le modèle est dès lors un puissant outil de conception et/ou d'évaluation. Les modèles de culture permettent notamment de tester l'agencement de combinaisons complexes de techniques ou de successions de culture face à la variabilité du climat ou du sol par exemple. Les modèles permettent une exploration des possibles à moindre coût mais seulement lorsque l'on dispose du modèle approprié, ce qui est finalement assez rare. En effet, de nombreuses plantes sont orphelines de tels outils (comme les agrumes par exemple) et les construire entièrement ou les paramétrer nécessite aussi du temps.

Les méthodes de conception basées sur les dires d'expert comme le prototypage (Vereijken, 1997) s'imposent lorsque que la diversité des techniques à tester ne peut pas être prise en compte par les modèles de culture (Loyce & Wery, 2006). Les experts se substituent alors aux modèles et construisent des prototypes qui seront testés et évalués sur la base des objectifs d'amélioration du système préalablement déterminés par les acteurs. La construction des prototypes est consensuelle ce qui en fait un atout de la méthode car les démarches participatives favorisent l'adoption des innovations. Le prototypage favorise aussi l'interdisciplinarité notamment grâce aux objectifs d'évaluation multicritère des prototypes imposés par les objectifs d'amélioration du système.

Depuis sa formalisation par Vereijken (1997), le cadre conceptuel du prototypage a fait l'objet d'adaptation et d'amélioration (Lançon *et al.*, 2007). Il constitue aujourd'hui un cadre privilégié pour la conception des systèmes de culture car il est flexible et peut facilement englober d'autres concepts ou outils et notamment les modèles de culture couplés à des modèles d'évaluation et/ou de décision.

Durant ce travail de thèse nous nous proposons de formaliser une méthode de conception et d'évaluation des systèmes de culture que nous appellerons DISCS pour '*re-Design and assessment of Innovative Sustainable Cropping Systems*'. Cette méthode intègre les trois étapes de conception des systèmes de culture et repose sur trois autres principes qui sont au centre de nombreux travaux de recherche actuels (Réau & Doré, 2008) : travaux participatifs, démarche de conception récursive et évaluation multicritère. Notre méthode s'inscrit dans la lignée de la méthodologie du prototypage formalisée par Vereijken (1997) tout en s'appuyant sur un diagnostic agronomique. Elle intègre également une démarche itérative à trois échelles d'étude (parcelle, exploitation agricole et territoire) tout en identifiant explicitement le rôle des différentes catégories d'acteurs impliqués dans le processus de conception du système de culture.

Notre travail porte plus précisément sur la reconception (*redesign*) de systèmes. La reconception englobe les mêmes trois phases de la conception mais vise surtout à améliorer un système existant. D'après Hill (2006), la reconception prenant en compte une approche globale du changement est beaucoup plus efficace que les stratégies visant simplement à améliorer l'efficacité d'une technique ou d'un produit, ou à les substituer par d'autres techniques ou produits. Cette notion de '*deep design / redesign*', utilisée par Hill (2006) comporte à la fois l'idée d'une rupture avec le système existant, et une volonté de considérer le système de production dans son ensemble. Elle est particulièrement présente dans les approches écosystémiques (Hill, 2006 ; Gliessman, 2006) et particulièrement adaptée aux systèmes de culture pérennes dont le pas de temps de reconception est nécessairement plus long que celui nécessaire aux cultures annuelles. L'objectif de notre travail est de reconcevoir, pas à pas, le système de culture agrumicole guadeloupéen. Nous faisons l'hypothèse que ce choix de reconception par ajustements successifs couplé à une forte implication des acteurs à toutes les étapes du travail permettra de faciliter l'appropriation des innovations produites.

➤ **Le premier objectif de la thèse consiste à appliquer la méthode DISCS au système de culture agrumicole en Guadeloupe et de nous poser cette première question : l'implication de tous les acteurs (agriculteurs, chercheurs, acteurs publics...), à toutes les étapes de la reconception d'un système de culture, permet-elle d'aboutir à un système de culture innovant ?**

Nous faisons l'hypothèse que la co-conception d'un système de culture innovant peut faciliter les interactions multiacteurs et créer une dynamique de groupe accélérant à terme l'appropriation des innovations.

Nous développerons ce premier objectif dans le chapitre 2, les trois échelles d'études (parcelle, exploitation agricole et territoire) seront considérées même si le processus complet de reconception n'est pas terminé à ce jour. En effet, les particularités du système étudié, propre aux cultures pérennes, ne permettent pas de restituer l'ensemble de ce processus de reconception dans le temps imparti d'un travail de thèse. Dès lors, seules les premières étapes de la méthode DISCS seront ensuite détaillées dans cette thèse : de la détermination des objectifs de reconception à l'évaluation des 3 premières années du nouveau système de culture. Ces étapes déterminent trois autres objectifs de la thèse.

➤ **Le second objectif est de réaliser un diagnostic des pratiques agrumicoles guadeloupéennes en vue de déterminer et de hiérarchiser, avec les acteurs, des objectifs d'amélioration de ce système de culture. Nous proposons un cadre pour analyser les déterminants des pratiques culturelles.**

Nous faisons l'hypothèse que la structuration d'un système de culture en combinaisons logiques et ordonnées des techniques permet d'expliquer les modalités constitutives de ce système afin de le comparer à un système de référence et d'en déduire des objectifs d'amélioration.

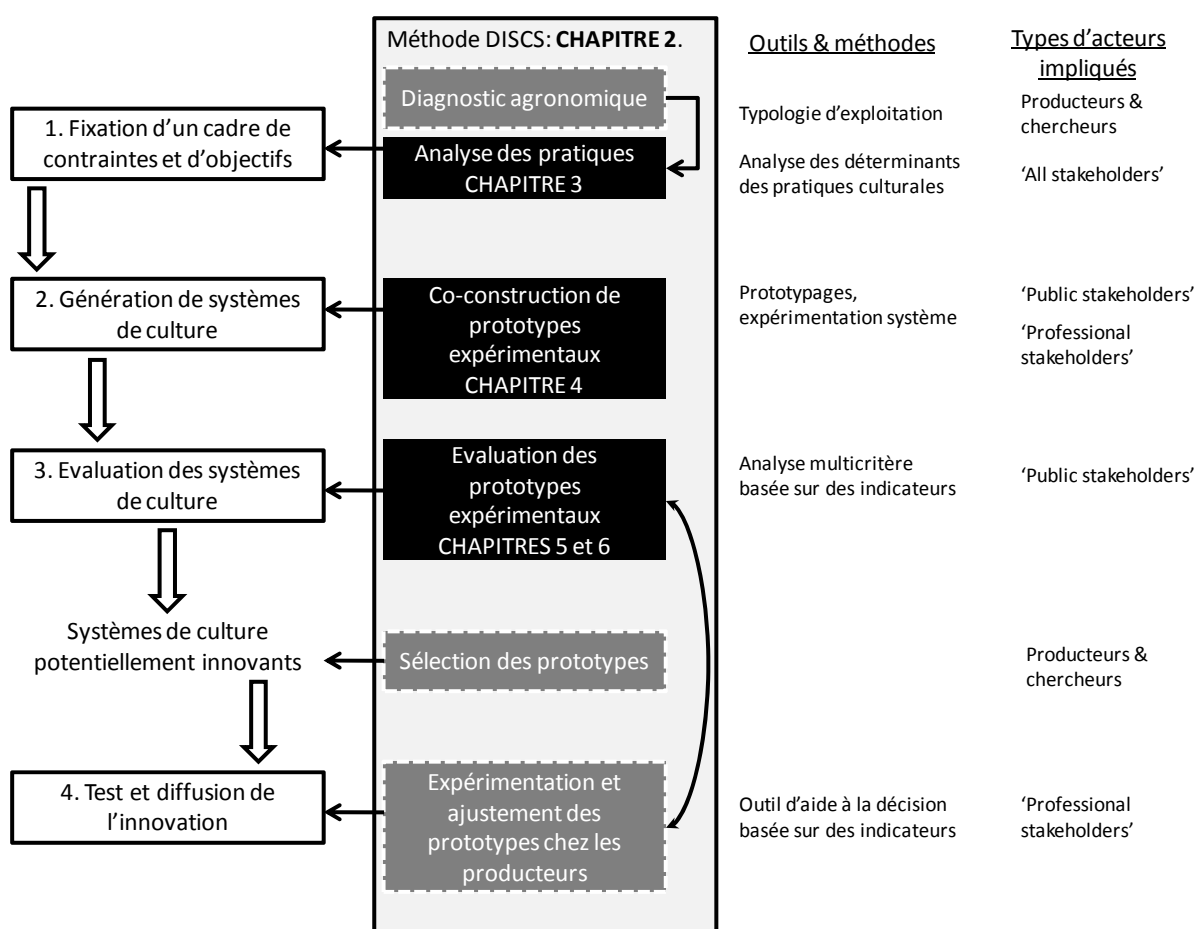
Nous répondrons à ce second objectif dans le chapitre 3 duquel découlera un cadre de contraintes. Il servira de base de discussion avec les acteurs pour déterminer les objectifs d'amélioration du système de culture agrumicole guadeloupéen.

Les systèmes de culture innovants co-construits (prototypes) pour répondre à ces objectifs d'amélioration seront présentés dans le chapitre 4. Ces prototypes constituent des tactiques de gestion de l'enherbement pour les vergers d'agrumes. Les résultats d'une expérimentation préalable à la conception de ces prototypes de gestion de l'enherbement seront également présentés dans ce chapitre 4 ainsi que le dispositif expérimental.

➤ **Le troisième objectif de la thèse consiste à évaluer l'intérêt de ces prototypes de gestion de l'enherbement dans le cadre d'une lutte biologique par conservation.**

Nous faisons l'hypothèse que créer des zones refuges grâce aux alternatives de gestion de l'enherbement par l'usage de plantes de couverture permettrait de lutter durablement contre les parasites (Khan *et al.*, 2008), de limiter de fait les risques phytosanitaires et donc les traitements qui y sont habituellement associés.

Figure 1.7 : Démarche de conception des systèmes de culture proposée par Loyce et Wery (2006) (cadres blancs) et positionnement des différentes étapes, outils et méthodes du travail de thèse. Le chapitre 2 (cadre gris clair) présente les grandes étapes de notre méthodologie de reconception des systèmes de culture (DISCS, reDesigning and assessing Innovative Sustainable Cropping System). Les différentes étapes développées dans le cadre de ce travail sont ensuite détaillées dans les chapitres 3, 4, 5 et 6 (cadres noirs). Certaines étapes (cadres gris foncé) ne sont pas restituées dans cette thèse mais ont été réalisées ou sont en cours de réalisation. Les outils de conception et d'évaluation sont précisés ainsi que les types d'acteurs impliqués dans chacune des étapes du cas d'application de la méthode. Pour ces acteurs, les différents types sont regroupés au sein de trois collectifs : 1/ 'All stakeholders' constitué d'environ 50 professionnels (agriculteurs, représentants des institutions et des groupements professionnels), 2/ 'Professional stakeholders' constitué de 3 producteurs, d'un agent du développement et 2 chercheurs et 3/ 'Public stakeholders' constitué d'un représentant des catégories d'acteurs suivantes : consommateur, producteur, services de l'état (DAF), gestionnaire de Parc National, formation professionnelle, santé, structures de commercialisation et recherche.



Ce troisième objectif sera développé dans le chapitre 5. Les prototypes seront évalués d'une part pour leur intérêt à fournir de la nourriture alternative aux auxiliaires des cultures (nectar) et d'autre part pour leur intérêt à héberger une famille d'auxiliaires des cultures, les phytoseiidae (prédateurs des acariens phytophages des agrumes, voir chapitre 1.2).

➤ **Le quatrième objectif de la thèse consiste à caractériser les impacts d'un changement de pratique (prototypes de gestion de l'enherbement) sur les performances du système de culture grâce à une analyse multicritère et à l'aide d'indicateurs. Basés sur les critères d'évaluation préalablement décidés par les acteurs, une transparence dans la construction et l'agrégation des indicateurs a été recherchée pour faciliter la prise de décision.**

Nous faisons l'hypothèse que les indicateurs constituent une réelle alternative aux mesures directes, notamment pour prédire les impacts pour lesquels les variables explicatives sont souvent d'accès difficile et/ou contraignantes à obtenir mais aussi pour rendre un résultat lisible pour les acteurs.

Nous répondrons à ce quatrième objectif dans le chapitre 6. Nous procéderons à une étude comparée des différents prototypes de gestion de l'enherbement selon les principes d'une approche systémique. Celle-ci reposera notamment sur l'établissement d'un jeu de règles de décision susceptible de résoudre les problèmes préalablement identifiés et d'un jeu d'indicateurs permettant d'évaluer l'atteinte de ces objectifs. Deux types d'indicateurs seront construits, les premiers évalueront les performances de la pratique avec des indicateurs mesurés (consommation en eau, en énergie...); les seconds, prédiront l'impact de la pratique sur l'environnement (perturbation de l'agrosystème, impact des pesticides, etc.).

Tous ces chapitres sont présentés sous forme d'articles dont les références bibliographiques sont regroupées en fin de document. La figure 1.7 positionne les différentes étapes de ce travail de thèse sur le cadre générique de conception des systèmes de culture proposé par Loyce et Wery (2006).

CHAPITRE 2

DISCS – UNE MÉTHODOLOGIE DE RECONCEPTION ET D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES

Ce chapitre correspond à l'article à soumettre à *Agronomy for sustainable development*, intitulé « Multi-stakeholder participatory re-design and assessment of innovative sustainable cropping systems. The DISCS method ». DISCS s'inscrit dans la lignée de la méthodologie du prototypage formalisée par Vereijken (1997) en intégrant cependant une démarche itérative à trois échelles d'étude (parcelle, exploitation agricole et territoire) tout en identifiant explicitement le rôle des différentes catégories d'acteurs impliqués dans le processus de reconception du système de culture. Notre démarche de reconception des systèmes de culture est ici appliquée au système de culture agrumicole guadeloupéen.

Rapport-Gratuit.com

MULTI-STAKEHOLDER PARTICIPATORY RE-DESIGN AND ASSESSMENT OF INNOVATIVE SUSTAINABLE CROPPING SYSTEMS. THE DISCS METHOD

Le Bellec F.^{1*}, Rajaud A.², Ozier-Lafontaine H.³, Bockstaller C.⁴, Malézieux E.¹

¹ CIRAD, UPR103, TA B-103/PS4, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5, France

² CIRAD, UPR103, Station de Bassin Plat, B.P. 180, 97455 Saint-Pierre, France

³ INRA, UR ASTRO, domaine de Duclos, Prise d'eau, 971 Petit-Bourg, Guadeloupe, France

⁴ INRA, UMR1121, IFR 110, BP 20507, 68021 Colmar, France

* lebellec@cirad.fr

Soumis à Agronomy for sustainable development

Abstract: Re-designing and assessing sustainable cropping systems has become a major challenge for agricultural researchers and farmers. In most prototyping methods, researchers are the main, or sometimes the only designers. However, more and more attempts for involving different kinds of stakeholders in participatory approaches have been accounted for. Besides, multi-criteria assessment tools are generally accepted as the solution to evaluating the overall sustainability of new cropping systems. The new method described here (DISCS) implements a participatory re-designing process, while developing at the same time specific multi-criteria assessment tools for each category of stakeholders involved. Though founded on the common structure of prototyping methods, this five-step-method differs first by implementing three progress loops, at experimental field, farm then regional scale. Besides, an ongoing progress dynamic is set between research at the experimental station and crop management in farms, in order to ensure that innovative techniques actually match the farmers' expectations. Assessment at each step is performed using a scale-specific set of indicators. The DISCS method was tested on citrus production in Guadeloupe (French West Indies), to develop lower-pesticide sustainable cropping systems. Five weed management prototypes were collectively designed then tested at an experimental station. Based on a multi-criteria comparison, farmers selected the innovative weed management techniques they wanted to try in their farms. We show here that, contrary to other prototyping methods, innovative cropping systems can be the product of a farmer-researcher collaborative design. It was also verified that the innovation process benefited from involving non-agricultural stakeholders in the definition of the objectives for sustainable cropping systems. Such step by step improvement is well suited to perennial cropping systems. Using the DISCS framework should enable stakeholders to target precisely the decision-aid tools that need to be designed for a specific issue, thus ensuring a direct link between research and application.

Key words: participatory approach, agricultural innovation, sustainability, cropping system design, multi-criteria assessment, DISC, prototyping method, decision-aid tool, pesticides, perennial system.

Table 2.1: Comparison of the different steps of DISCS with other farming system design methods

	Vereijken (1997)	Lançon (2007)	Cardoso (2001)	DISCS (2011)
Preliminary analysis			1-Survey	1-Agronomics diagnosis
Objectives	1-Hierarchy of objectives	1-Set of constraints and objectives	2-Participatory Rural Appraisal for assessing problems and possible solutions	2.1-Set of constraints and objectives
	2-Multi-objective parameters and corresponding farming methods			
Design	3-Theoretical prototype design	2-Theoretical prototype design	3-Diagnosis and design	2.2-Experimental prototypes design
			4-Consolidation meetings for finalizing initial experimentation design	
Test	4-Lay out and test on experimental farm then/or on pilot farms	3-Assessment and improvement on experimental farm	5-Collective monitoring	3-Lay out, monitoring and assessment on experimental station
		4-Assessment and improvement on farms		4-Integrate the selected prototypes in cropping systems on farms
Dissemination	5-Dissemination			5- Dissemination, monitoring and new evaluation

2.1 Introduction

While society's expectations of agriculture were long limited to feeding the world, the recent paradigm of sustainable development has made life more difficult for agricultural professionals, and agricultural practices and their consequences have become a matter of public concern and debate. Faced with stricter state regulations, conditions governing public subsidies and consumer expectations concerning quality and traceability, farmers have had to change their practices, sometimes profoundly, and to provide evidence that they have satisfied the criteria required for sustainability. Therefore re-designing and assessing sustainable cropping systems has become a serious challenge for agricultural researchers, who have developed and improved prototyping methods and tools to facilitate the designing process. Two main problems face researchers: the appropriate extent and the modalities for participatory design, and the necessary yet problematic complexity of monitoring and assessing systems that include a satisfactory range of sustainable criteria.

In the 1990s, a European network of research teams was set up to design integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) as a sustainable alternative to intensive agriculture. As a result, in 1997, Vereijken proposed a five-step "methodical way of prototyping I/EAFS" (Vereijken, 1997). In addition to the two obvious steps involved in prototyping – designing a theoretical prototype and then testing and improving it – this prototyping method (Vereijken, 1997) included a preliminary step of establishing a hierarchy of objectives for the prototype, a second step of transforming the objectives into a set of multi-objective parameters and methods to achieve them, and finally a fifth step of disseminating the resulting prototype (Table 2.1). Vereijken (1997) also underlined the importance for the research team of prototyping in interaction with farmers on pilot farms, in order to develop variants of a prototype corresponding to a range of different farming conditions. The prototypes are evaluated using a set of indicators related the consumption of natural or human resources as well as to yields and to the quality of production. Dissemination of the prototype is expected to take place by diffusion from a group of pilot farms to other farms in the area. With the aim of developing integrated cotton cropping systems in West Africa (Lançon *et al.*, 2007), the design process of this prototyping methodology was extended to a wider range of multidisciplinary experts and local stakeholders. Constraints were identified and theoretical prototypes were elaborated during multidisciplinary scientific workshops and adjusted locally in regional scientific workshops. In this type of prototyping methodology, the goal for agronomists and other scientists is to produce a new complete arable farming (Vereijken, 1997) or cropping (Lançon *et al.*, 2007) system, ready to be implemented on farms after completing a prototyping process (Vereijken, 1997; Lançon *et al.*, 2007).

In this approach, farmers mainly play the role of consultants. They have to approve the set of constraints and objectives, to comment on the theoretical prototypes, and to provide feedback while putting the final prototypes into practice on their farms. Scientists remain the designers of the farming system. However, examples exist of more active involvement of farmers. Cardoso *et al.* (2001) engaged in participatory research while refuting its definition as "a simple matter of some group discussions out of which emerges a collectively agreed plan that is then implemented".

Instead, they enrolled two classes of stakeholders – researchers and farmers – at each step in designing, monitoring and evaluating prototypes of agroforestry systems. These authors highlighted the benefits for farmers of voicing and prioritizing their difficulties and of taking part in the design of the prototypes they were expected to test on their farms: despite mixed results in the performances of the prototypes at the end of a five-year-process, farmers chose to continue improving the agroforestry systems. Cardoso *et al.* (2001) concluded on the transformation of the initial “participatory approach” into a “dynamic learning process”, and underlined the importance of participatory monitoring for continual learning in the design of agroforestry systems.

The participatory approach also plays a central role in model-based prototyping methods, and the most successful examples involved farmers in the design process (Cox, 1996; Carberry *et al.*, 2004). However, Cox (1996) questioned the relevance of scientifically-designed complex decision support systems (DSS) for routine monitoring and decision making. Monitoring and assessing cropping systems using indicators is an alternative to modeling cropping systems. Aiming at global sustainability requires simultaneously assessing ecological, social and economic criteria. Accordingly, several complex assessment tools based on a set of indicators have been developed for the assessment of practices at field scale (Bockstaller *et al.*, 1997) or farm scale (Meul *et al.* 2008), and for ex-ante assessment of cropping system prototypes (Sadok *et al.*, 2009).

The method for designing (Girardin *et al.*, 2005) and validating (Cloquell-Ballester *et al.*, 2006) assessment indicators has already been formalized. In recent years, calling for further involvement of farmers has become a leitmotiv in reports on the design and assessment of decision support tools (King *et al.*, 2000; Meynard *et al.*, 2002; Lopez-Ridaura *et al.*, 2002; Nolot and Debaeke, 2003). King *et al.*, (2000) highlighted the need for participatory processes in the definition of indicators involving farmers together with the scientists, in order i) to benefit from farmers’ expertise and ii) to give ownership of the indicators to the farmers. Nolot and Debaeke (2003) suggested that involving the producers in the process of building the indicators helps ensure the producers have confidence in the indicators’ outputs. Such confidence is a precondition for turning a set of indicators into producer-targeted decision-support tools for the participatory design of innovations.

Multi-criteria assessment tools and participatory cropping systems design are thus two of the main solutions offered by research to today’s need for sustainable innovation in agriculture. Here our aim is to propose an improved method to get agricultural specialists (farmers and researchers) to work in collaboration with public stakeholders, to design and implement innovative cropping systems while addressing all three issues involved in sustainable development. The resulting DISCS (re-Design and assess Innovative Cropping Systems) method was tested on citrus production in Guadeloupe (French West Indies), to develop lower-pesticide sustainable cropping systems.

2.2 Material and Method: definition of the five steps in the DISCS method

Support for the citrus industry was a priority of the Guadeloupe rural development program (2007–2013) to enable local demand for citrus fruits to be satisfied, this market currently mostly being covered by imports. However, in addition, producers must move towards a reduction of chemical inputs, in accordance with national objectives (Ecophyto, 2008). This ruling happened when citrus producers are still facing unresolved technical difficulties, and are struggling to promote the quality of their products on the local market. To re-design citrus cropping systems in Guadeloupe, the first challenge was to choose a method that included the need to preserve existing orchards while improving agricultural practices. The DISCS method we present and test here is part of the family of prototyping methods following Vereijken (1997). Although they follow a common path, for all prototyping methods (Vereijken, 1997; Cardoso *et al.*, 2001; Lançon *et al.*, 2007), including DISCS, the successive steps are numbered differently (table 2.1). The DISCS method differs from Vereijken (1997) by organizing collaborative work between different classes of stakeholders and introducing loops of iterative improvement, at steps 3, 4 and 5 (only gradual improvement is compatible with the management of perennial systems). Here we use the term “public stakeholders” to refer to representatives of state and regional institutions and of the agricultural sector. The term “professional stakeholders” refers to the scientists, farmers and agricultural advisers involved in the innovation process. The five steps of the DISCS method (table 2.1) are detailed below.

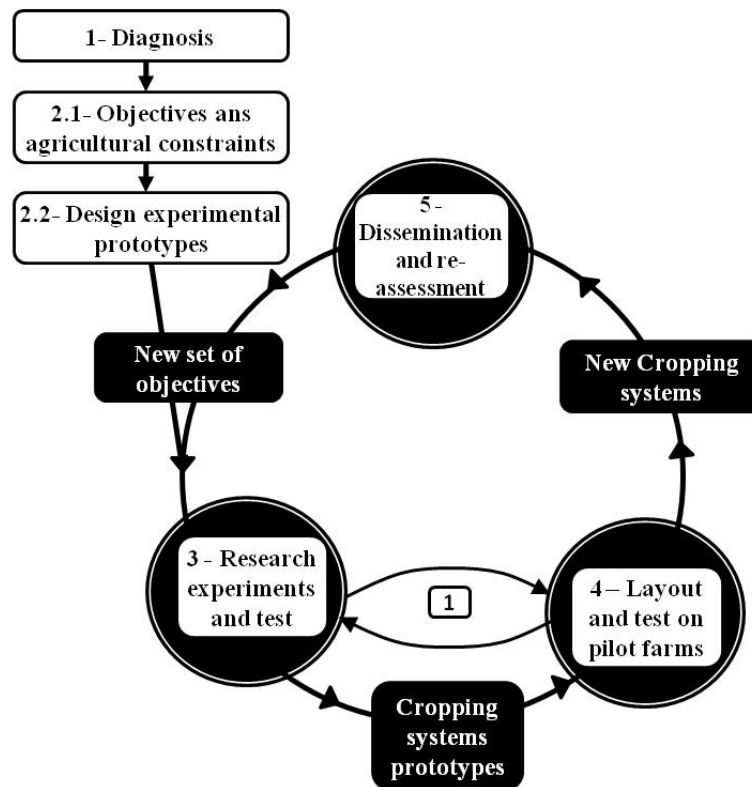
2.2.1 Step 1: Diagnosis

An agronomic diagnosis is performed at the scale of a region or territory. While the territory concept remains fuzzy, its boundaries depend on the issue to be addressed (for example a watershed for a problem of water pollution or an administrative region for a regulation problem) and needs to be clarified and completed at steps 1 and 2. The results of the diagnosis provide material for defining objectives for new cropping systems.

2.2.2 Step 2: Objectives and prototypes

First, a public meeting is organized when representatives of public and professional stakeholders are presented with results of the agronomic diagnosis. The main constraints are identified and the objectives for re-designing cropping systems are negotiated then. The resulting set of objectives provides the criteria for the future evaluation of the cropping systems. Second, “experimental prototypes” for cropping systems integrating innovative techniques are collectively designed by a group including researchers, farmers and agricultural advisers (“professional stakeholders”). In contrast to Lançon *et al.* (2007)’s approach, in this method, the designer group is small and composed only of local stakeholders to favor the use of local knowledge. In the case of a gradual improvement process, this step actually consists in *re-designing* existing cropping systems. The prototypes that will be tested at step 3 therefore only differ from existing cropping systems by one practice of technique.

Figure 2.1: The DISCS method. Steps 3, 4 and 5 consist in progress loops running at the same time. Between the research experiments and the tests on farms, a to-and-fro movement enables continual adjustment of the prototypes (1).



2.2.3 Step 3: Research loop at the experimental station

An experiment is set up at an agricultural research station to test and adjust the experimental prototypes designed at step 2, following a plan-do-check-act process. Observed results are subjected to multi-criteria analysis to validate the performance objectives that were fixed at step 1, in comparison with existing cropping systems. Although this step is managed by researchers, validation and selection of the best prototypes also involves the farmers. Consequently, the assessment tool for step 3 is built to assess performances and to provide farmers with a comparative analysis that will enable them to make a well-informed choice at step 4.

2.2.4 Step 4: Development loop on volunteer farms

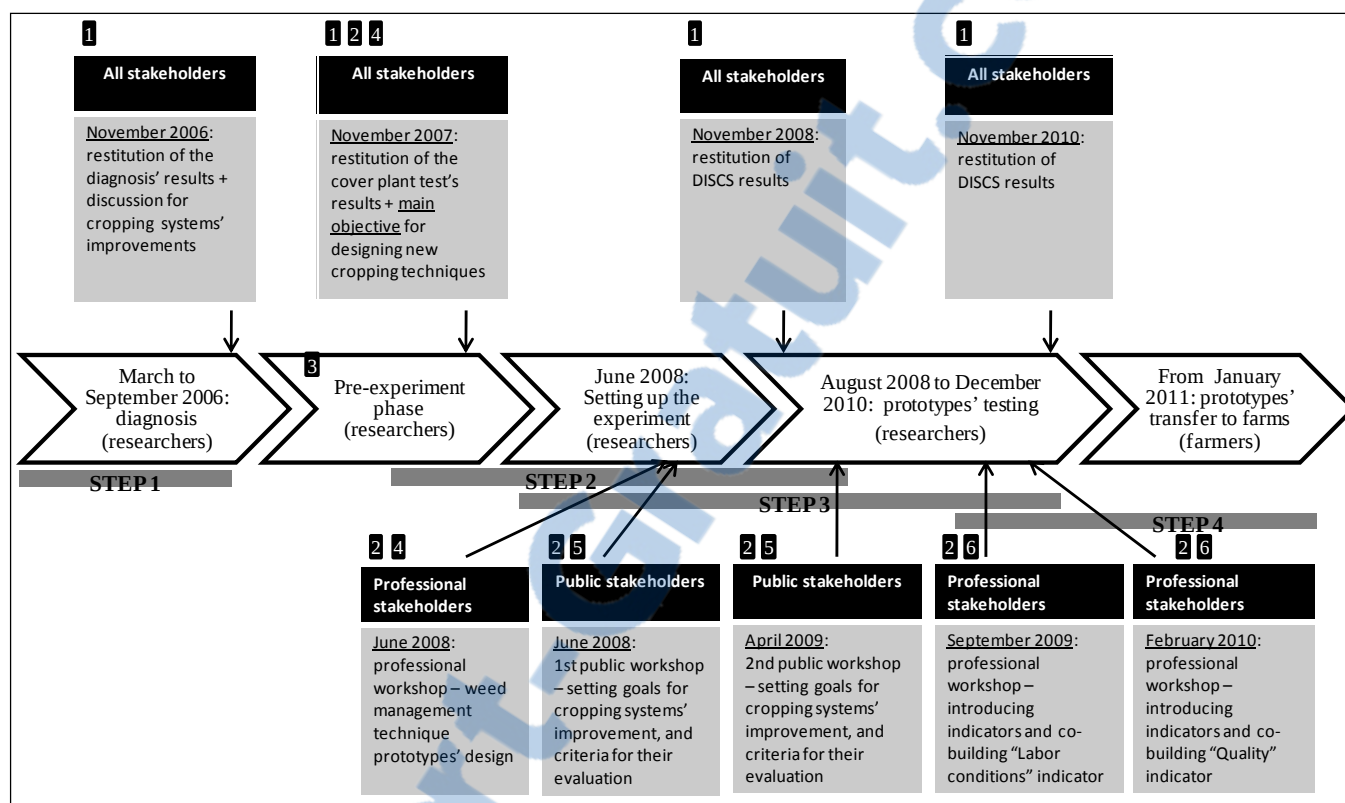
Based on the results achieved at step 3, farmers are able to select a prototype and to put it into practice on their own farm. Since the experimental prototypes were designed to differ only by one practice from existing cropping systems, farmers actually incorporate the innovative practice to their own cropping system. Farmers are then entitled to proceed to the necessary changes in their new cropping systems. A plan-do-check-act process is used on the farms in the same way as at the experimental station, and the farmers pass on their observations, results, difficulties and suggestions to the researchers to enable them to adjust the following experiments. Thus steps 3 and 4 are conducted at the same time, and feed from each other. The decision-aid tool designed for step 4 is intended for farmers to use. It consists in a set of assessment indicators that address the three aspects of sustainability (environmental, economic and social sustainability) equally. The indicators' results enable the farmers to implement their cropping systems while visualizing the resulting impacts with respect to all the objectives they are pursuing (collectively defined at step 2). It is crucial that farmers appropriate this monitoring tool. To this end, rather than merely 'passing on' existing indicators to farmers (with the risk that these indicators are not completely suitable for the issue at stake), several indicators are selected, adapted and even co-designed in a participatory process (King *et al.*, 2000; Meynard *et al.*, 2002).

2.2.5 Step 5: Territory loop

Only once the cropping systems of the farmers involved in the project have been adapted to integrate new cropping practices, they can be considered as innovative cropping systems. Further transfer to farmers who were not involved in the project is done either by diffusion or by extending the pilot farmer network. A new territorial diagnosis should then be preformed to re-orientate the ongoing progress dynamics at this scale. As the decision aid tool designed for step 5 is intended to be useful for public decision makers, it has to be packaged in a synthesized form. Its indicators should be at least partly used for the following diagnosis (step 1).

Therefore, the DISCS method implements three continual loops of progress (see figure 2.1): i) a research loop (step 3), run by researchers at an experimental station where innovative techniques are tested and improved, ii) a development loop (step 4), run by farmers on their own farms where innovative techniques are integrated in real cropping systems.

Figure 2.2: Chronology of the re-design of citrus production using the DISCS method. Public and agricultural stakeholders were involved during progress meetings (1) and participatory workshops (2). Preliminary research was needed before designing the prototypes (3). Step 2 started after the diagnosis (4), and continued while step 3 had already begun, for sorting out assessment criteria (5). Step 4 started with the designing of the farmers' decision-aid tool while step 3 was still running (6).



A to-and-fro movement between steps 3 and 4 continues until a new cropping system has been characterized and validated by the researchers and the farmers, and put into practice on the farms. iii) A territory loop (step 5) is finally run by public stakeholders and/or researchers where the effect of changing practices at farm scale is evaluated at regional scale. Each of these three progress loops includes an assessment step to validate the innovation (of new techniques, then of new cropping systems) and to pass on explicit results and orientations for the next step. A specific multi-criteria assessment tool that reflects the general objectives fixed for the cropping systems is then built for each step. Because the assessment has to be understood by a range of different stakeholders, rather than using variables expressed in physical units, assessment tools are composed of indicators: variables that have been given meaning by setting reference values related to the objectives to be achieved. For each tool, existing indicators may be used if they are deemed relevant, or if not, specific ones are built.

2.3. Results of a case study and discussion

The main concern in re-designing citrus cropping systems was to develop lower-input cropping systems with improved economic and quality performances, in a move toward sustainable citrus production in Guadeloupe. The DISCS process was set in motion in 2006 and is still running (2011); the chronology of the case study is detailed in figure 2.2. Here we describe the application of the DISCS method from step 1 to step 4, commenting on its achievements and limitations. Since all Guadeloupian citrus growers were able to refer to a common reference crop management (Le Bellec *et al.*, 2011a), diffused by technical advisers, the whole region was considered as the territory scale.

2.3.1 Step 1. Diagnosis: Comparing farmers' practices to a reference crop management

The diagnosis was performed on a representative sample of citrus growers in the region: 41 citrus producers were interviewed in 2006. Farmers were classified in three types of farming systems: 'citrus growers' for whom citrus represents the main or only activity; 'dual producers', characterized by the co-existence of two main agricultural activities, citrus being the second crop; and 'diversified producers', characterized by at least three agricultural activities, with citrus as one diversification crop among others (Le Bellec *et al.*, 2011a). The method of diagnosis was chosen to assess the relevance and the performance of the reference crop management that had been diffused to all citrus growers a few years earlier. The reference crop management covered five main combinations of cropping practices. For every farm visited, the survey evaluated whether the reference crop management was respected for each of the five combinations of cropping practices. In addition, two levels of performance were expected from citrus crop management: i) to reduce pesticide use, and ii) to improve yields and the quality of the fruit. At each orchard visited, these two performances were evaluated using two indicators i) the same indicator, TFI (treatment frequency index), used by the State services was chosen to evaluate the level of pesticide use and ii) a visual estimation of the state of health of the trees accounted for the potential profitability of a tree. Le Bellec *et al.* (2011a) concluded that the two main technical constraints that needed to be overcome to improve Guadeloupian citrus cropping systems were: i) the fact that many fields could not be mechanized due to steep slopes and stony soils, and ii) the lack of producers' specific skills concerning phytosanitary management of the orchards.

Table 2.2: Objectives for innovative citrus cropping system and corresponding assessment indicators at steps 3 and 4. Part of the assessment indicators are common to steps 3 and 4, part are specific of one step. Qualitative indicators are based on a decision tree and display a score ranging from 0 and 10. Quantitative indicators are expressed in physical units. The GAP-I aggregates three indicators, API, I-phy and NPI. The NPI (Nectar Provisioning Indicator) indicator is presented in a companion paper (Le Bellec *et al.*, 2011b).

Objectives	Criteria	Indicators				
		Step 3	Step 4	Indicators' type (unit)	Input variables involved	Reference
O1 Control soil erosion	C1 Ground cover stability	GAP-I (good agricultural practices indicator): {API;NPI;Iphy}	API (agricultural practice impact)	Qualitative (0:10)	Frequency of ground cover disturbance (mowed / herbicide), ground cover rate and Biomass.	Based on Le Bellec et al. 2010a
O2 Reduce need for pesticides	C2 Agrosystem resilience					
O3a Reduce impact of pesticides	C3 Pesticides		IPHY (pesticide indicator)	Qualitative (0:10)	Soil and habitat characterizations, sprayer type, active ingredient characteristics	Based on Van der Werf and Zimmer 1998
O3b Reduce use of pesticides	C3 Pesticides	TFI (treatment frequency Index)		Quantitative (Number of doses ha ⁻¹)	Active ingredient : Dose applied and surface treated	Ecophyto, 2008
O4a Maintain yield	C4a Trees (yield)	IPERF (performance indicator)		Qualitative (0:10)	Trunk diameter (or field yield) and tree health	*
O4b Ensure fruit quality	C4b Fruit quality and security	QSI (quality and security)		Qualitative (0:10)	Acidity/sugar ratio, level of freshness, delay before picking	*
O5 Reasonable water use	C5 Water	IWATER (water supply indicator)		Quantitative (m ³ ha ⁻¹)	Water supply	*
O6 Reasonable energy demand	C6 Energy	CED (cumulative energy demand)		Quantitative (MJ ha ⁻¹)	Direct and indirect energy consumption (fertilizers, biocides, petrol...)	Frischknecht et al. 2003
O7 Ensure profitability	C7 Costs	ICOST (cost indicator)		Quantitative (€ ha ⁻¹)	Running costs of production	*
			EE (economic efficiency)	Qualitative (0:10)	Net margin, production costs	*
			EA (economic autonomy)	Qualitative (0:10)	Subsidies, net margin	*
O8 Maintain social balance	C8 Labor	ILABOR (labor indicator)		Quantitative (h ha ⁻¹)	Amount of labor required to operate	*
			LC (labor conditions)	Qualitative (0:10)	Work safety, work painfulness, professional training	*
			LI (local industry)	Qualitative (0:10)	Local inputs production costs, imported input production costs	*

*Specific construction for case study

In practice, the choice of the assessment criteria depends on the problem that led to the need to redesign the cropping system, in our particular case, the State initiative to reduce the use of pesticides.

Step 1 concluded with a progress meeting gathering 50 professional and public stakeholders involved in the project, in November 2006, when the results of the diagnosis were presented (figure 2.2). According to these results, it was collectively agreed to focus the redesign process on developing an alternative low-input weed management compatible with the impossibility to mechanize.

2.3.2 Step 2. Objectives, assessment criteria and prototypes' design

A second public progress meeting was held in November 2007, when the preliminary research results were presented (figure 2.2). These results concerned the feasibility of solving the mechanization problem by planting a ground cover plant as a weed management strategy. The choice for the ground cover plant was then validated (see "Step3"). Held in June 2008, the first technical workshop team included three producers and one adviser, who brought field experience, and two researchers, who had been conducting research on citrus production for ten years. The prototypes were designed and step 3's assessment criteria were sorted out during this workshop. Eight sub-objectives (table 2.2) were selected: i) controlling soil erosion, ii) reducing the need for pesticides, iii) reducing the impact of pesticides, iv) maintaining good yields, v) achieving reasonable water use, vi) reasonable energy use, vii) limiting production costs and viii) involving reasonable manual work. Seven composite indicators were selected or designed for step 3's evaluation (table 2, column 'step 3'). The characteristics of the indicators are listed in table 2. At step 3, the prototypes mainly concerned the weed management technique. As a result, objectives 1 to 6 were important for the evaluation of this step. Four indicators were used to assess the first three objectives including three indicators aggregated into one GAP-I (good agricultural practices). For objectives 7 and 8, two indicators enabled estimation of total costs and hours of work, respectively.

Five experimental prototypes (table 2.3) were collectively designed by the same workshop team. These differed in ground cover management techniques: one prototype involved the systematic use of herbicide (prototype GLY), two prototypes managed with a spontaneous plant cover, either perennial (prototype PV) or annual (prototype AV), and two prototypes involved sowing a ground cover plant, again perennial (prototype PNeo) or annual (prototype ANeo). Prototype GLY involved the citrus producers' current practices and prototype PV was the reference crop management (Le Bellec *et al.* 2011a). The criteria and indicators for step 4's evaluation were only sorted out later, during two public workshops, thus extending step 2 until after step 3 had started (figure 2). In June 2008 and April 2009, a group of eight different stakeholders' representatives gathered to set the objectives for a global evolution of citrus cropping systems: three professional stakeholders (a farmer, a researcher and an adviser) and three public stakeholders (a consumer, a member of the public administration and an agent from the natural park) were initially invited by the project manager. This initial group co-opted two more participants (a salesman and a health professional) to the workshop.

Table 2.3: Characteristics and performance of the five experimental prototypes at step 3 performed in the citrus orchard trial (Guadeloupe, August 2008 to December 2010). GAP-I: good agricultural practices indicator. TFI: treatment frequency index. IPERF: performance indicator. CED: cumulative energy demand. GAP-I and IPERF: means from the experimental period (August 2008 to December 2010); other indicators: means ha⁻¹ year⁻¹. *Neonotonia wightii* was selected as a ground cover plant during preliminary research.

Weed management prototypes	Type of vegetation	Indicators						
		GAP-I (0 to 10)	TFI (Number of doses)	I-PERF (0 to 10)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)
PV: Perennial Vegetation Mowed (3 years ⁻¹) 'Reference practice'	Spontaneous	5.3	3.2	5	5500	13633	1919	126
GLY: Annual Vegetation Herbicides (whole S ² :3 year ⁻¹) 'Current practice'	Spontaneous	3.4	5.6	10	4900	7566	1143	60
AV: Annual Vegetation Mowed (3 years ⁻¹) Herbicides (whole S ² :1 year ⁻¹)	Spontaneous	5.0	3.2	8.4	5355	12300	1875	128
ANeo: Annual Vegetation Herbicides (whole S ² :1 year ⁻¹)	Planted with <i>Neonotonia wightii</i>	6.9	4.3	7.2	5490	6733	1017	41
PNeo: Perennial Vegetation Hand management	Planted with <i>Neonotonia wightii</i>	7.0	1.3	3	5825	5066	2069	199

Whereas all the objectives were common to steps 3 and 4, step 4's indicators focused on objectives 7 and 8 to account for differences in production factors (human resources and quantities and prices of inputs) from farm to farm. The QSI (quality and security indicator) indicator was added at the specific request of the non-scientific stakeholders, whereas all the others had been suggested by the researchers. The QSI was subsequently revealed to be particularly important, as it helped focus on the actual economic value of the production. The "quality" criterion provided matter for a debate that engaged every single stakeholder. Given that the case study described here focused on herbicide use, only a simple QSI indicator was used (combining the level of acidity and sugar in the fruit and observance of sanitary regulations). However, we expect that designing a more complex QSI indicator will be crucial for further improvement dynamics.

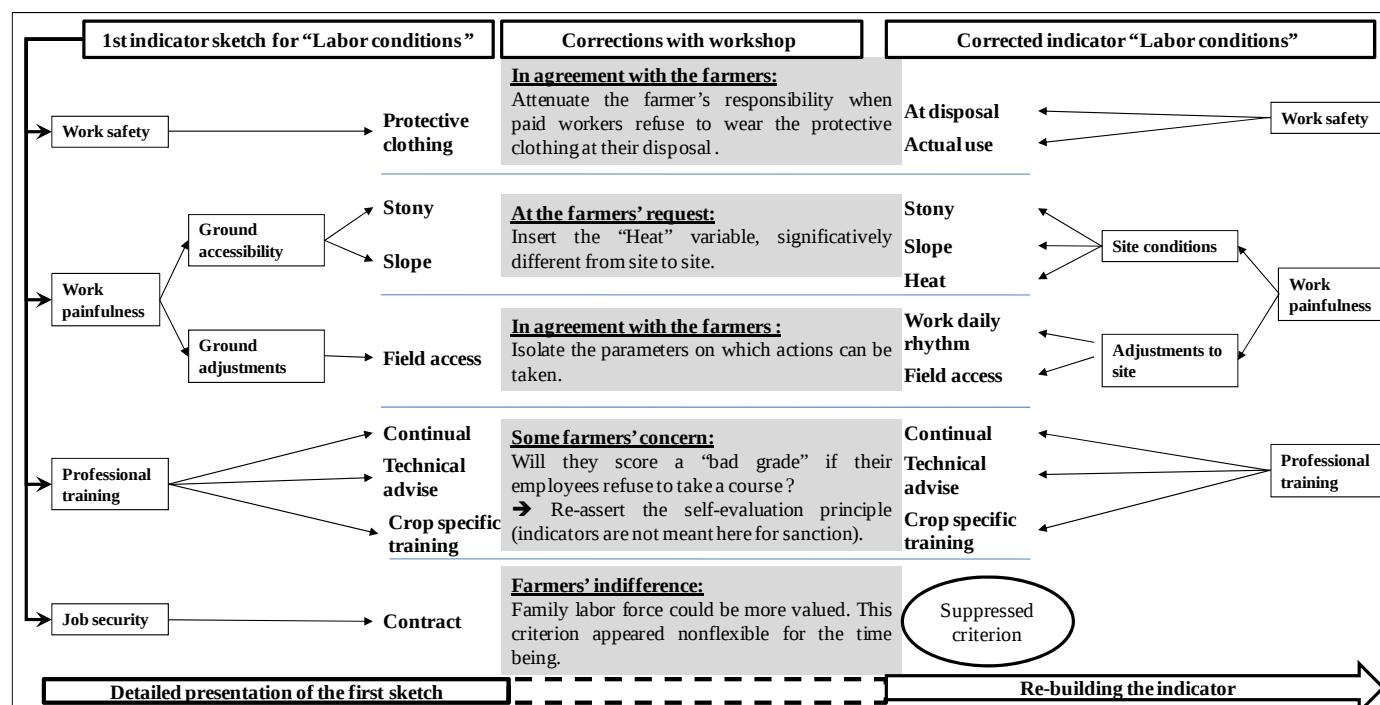
2.3.3 Step 3. Research Loop: test and multi-criteria analysis of the experimental prototypes

Experiments were performed at CIRAD's experimental station in Vieux-Habitant, in the citrus production area on the west coast of Guadeloupe, 16°N, 61°W. Based on the results of previous research (Le Bellec *et al.*, 2010a), *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae) was selected as a perennial ground cover plant for weed management without mechanization. Tests in adult orchards showed no difference in tree growth or yield in orchards with or without *N. wightii*. However, water stress was shown to be linked with a slower growth rate for younger trees (before full production) in orchards managed with *N. wightii* ground cover (unpublished results). All five prototypes, repeated five times, were tested and compared in a young orchard (planted in January 2008) from August 2008 to December 2010. Complying with the reference crop management, the five prototypes only differed in weed management. Expected impacts were monitored using the multi-criteria assessment tool designed at step 2.

All three experimental prototypes had advantages and drawbacks. AV performed better in terms of growth and water needs in young orchards. Besides, close to the "reference practice" recommended by the reference crop management, one main advantage of AV was its limited need for investment. Several farmers expressed an interest in implementing this weed management technique in their orchards. PNeo enabled weed management without the use of herbicide. Despite PNeo's poor I-PERF result, the competition between the cover plant and young trees based could be avoided by planting it only in adult orchards (based on results in Le Bellec *et al.* (2010a)). Finally, despite the fact ANeo had the second highest TFI value, it achieved acceptable GAP-I and IPERF (performance indicator) results and the lowest cost and labor values (table 2.3). ANeo was therefore identified by the scientists as the best alternative to the current practice (GLY). However, and despite ANeo's good results for ICOST and ILABOR compared with the control (GLY), farmers expressed more interest in PNeo, as they were discouraged by ANeo's need for annual investment (for the cover plant needed to be sown again every year).

Step 3's indicators enabled the researchers to assess the results of the experimental prototypes, and to explain their strengths and weaknesses to the farmers. A detailed analysis of the results of step 3 and the building of assessment indicators is presented in a companion paper. However, although this set of indicators enabled a farmers' well informed choice between the prototypes, it failed to predict farmers' final choices.

Figure 2.3: Co-building the Labor Conditions indicator. A first selection and organization of field accessible criteria was performed by the researchers. This result was submitted to a group of ten farmers: selected criteria, missing criteria, reference values and the hierarchy of the criteria were discussed. A new farmers-researchers workshop is planned to validate the final aggregation performed by the researchers.



The determining factor was the need for investment, which was discussed by researchers and farmers but did not appear in this set of indicators (since it had not been selected as a criterion at step 2). As a result, a future improved set of assessment indicators will need to include this criterion.

2.3.4 Step 4. Development loop: design of a decision-aid tool for farmers' use

2.3.4.1 Spontaneous appropriation

Even before the end of experimental trials, the PNeo prototype was put into practice by a citrus producer in 2008. Encouraged by the results of step 3 and by the success of their fellow farmer's orchard, in 2010 more citrus producers planted *N. wightii* as a ground cover. The first producers to spontaneously adopt the new weed management techniques were those who had taken part in the design of the prototypes and/or indicators (steps 2 and 4). This not only emphasizes the positive effect of involving the producers in the design but also the efficiency of the demonstration on "pilot" farms in motivating other farmers.

2.3.4.2 Design of decision-aid indicators

Following the proposal of Bockstaller *et al.* (1997), all step 4's indicators are meant to display a score ranging from 0 and 10: this makes the performance of each indicator easy to understand, and the homogeneous display makes the results of different indicators easy to compare. The assessment tool was designed by the researchers. However, from the ten-indicator assessment tool, the researchers presented two indicators to a technical workshop that included ten citrus growers, two researchers and one agricultural adviser. One indicator, IPHY (pesticide indicator), was merely presented and explained by the researchers. The second indicator, LC (labor conditions), was the subject of collective discussion and correction. Figure 2.3 shows how the initial structure of LC indicator was modified following agreements reached during this workshop. The LC indicator remained the subject of discussion for several days, attesting to the involvement obtained from farmers, whereas the IPHY indicator was the subject of no additional comments. We interpreted the difference in the farmers' attitude to the two indicators as a beginning of appropriation of the LC indicator by farmers that was facilitated by their involvement in the design of the indicator. Such a result corroborates the recommendations of other authors for the collective design of decision support indicators (King *et al.*, 2000). Although it may not appear reasonable to co-design all the necessary indicators, when developing decision-aid tools, we recommend considering a collective design as often as possible. In the present case, for instance, converting IWATER and CED into qualitative indicators (which implies setting meaningful reference values) will be done collectively.

In the further development of the DISCS farmers' targeted decision-aid tool, two aggregation levels will be introduced to allow users to have both an overview of the performance of a cropping system, and to focus on the details of some aspects (Meul *et al.*, 2008). A "display level" will summarize the performances of a cropping system with respect to the goals determined at step 2. At a second level, an "interpretation level", the variables will be less aggregated so that the points where more actions are needed to improve the performance will be apparent.

2.4 Discussion

2.4.1 Benefits of a participatory approach

The DISCS method triggers a to-and-fro movement between farmers and researchers that is facilitated by the farmers' use of assessment indicators, these indicators also providing a discussion-support tool for farmers and researchers. The resulting innovation, new cropping systems put into practice by farmers, is thus the product of their collective activity (after completing steps 3 and 4). Innovation no longer emerges directly from the experimental station, were only innovative technical proposals are really produced. All stakeholders thus become actual designers. DISCS's fundamental principle is to proceed step by step developing only innovative proposals that producers are willing to test in their own fields. A consequence for the research activity was that several potential ways for innovation the scientists thought were promising were abandoned. One might regret, that such a principle deprives the agricultural profession of more innovative, and maybe more immediately efficient progress. It ensures, however, that farmers appropriate the collectively selected innovative techniques.

With the DISCS method, in the same way that the new cropping systems are the result of researchers and farmers' collective design, objectives for the new cropping systems are collectively determined by different stakeholders. Landais (1998) explained how sustainable development could be interpreted as an opportunity for a "new social contract" between agriculture and society. DISCS adopts the same angle by distributing the innovating activity between two groups: one comprising public stakeholders and the other, agricultural stakeholders. The public stakeholders (here civil society and citrus industry) group discusses the final objectives of the general innovation issue. Their workshops provide an opportunity to negotiate acceptable compromises among themselves (Rossing *et al.*, 1997). The agricultural stakeholders group takes responsibility for the design of new cropping systems. While the agricultural stakeholders continuously move forward in their innovation process, the public stakeholders intervene from time to time, either during specific workshops (step 1 and 2), or during periodical progress meetings.

2.4.2 Providing relevant multifunctional tools

Ongoing progress dynamics calls for monitoring tools that the different stakeholders can use to assess and analyze the results of the innovation process, to make sure they actually match the objectives that were chosen (Meul *et al.*, 2008). The DISCS method includes the design of three scale-specific monitoring tools corresponding to the three progress loops. Corresponding indicators between scales may differ by nature (when all the assessment criteria are not relevant at each scale) and by the level of aggregation (when more or less detailed information is needed at different scales) (Stein *et al.*, 2001). At experimental station scale (step 3), the assessment indicators that comprise the monitoring tool may support a high level of complexity and require a lot of precise input data. At territory scale (step 5), however, the tool's indicators must provide information that can be understood by public stakeholders. While they may support a lower level of technical acuity, they should provide a straightforward comparison of different possible technical pathways to achieve global ecological and socio-economic sustainability objectives. These are indicators of a high level of aggregation.

Rapport-Gratuit.com

Their selection will depend on the definition of the territory. At farm scale (step 4), the monitoring tool is a decision-aid tool for farmers. The indicators need to represent a balance between accuracy and ease of use. The set of indicators used for the present study is still not complete. The existing set will be extended during the course of the innovation process, and as the technical issues become more and more precise the selection of existing indicators and their need for adjustment to the specific context will be further clarified. The indicators that were developed for the present study may be useful in other contexts, but they would probably need to be adapted.

2.5. Conclusion

In contrast to the classic “top-down” approach to agricultural innovation, i.e., researchers innovate, farmers put into practice – the DISCS method is a farmer-researcher co-design process that creates the conditions for an ongoing dynamic relationship between agricultural and public stakeholders to build a solution that can continuously be adjusted to stakeholders’ expectations. While a complete re-design of cropping systems may be manageable for arable systems (Vereijken, 1997; Lançon *et al.*, 2007), step by step improvement is better suited to perennial cropping systems. DISCS is therefore an appropriate method for improving an existing reference cropping system or current practices. Alternatively, it could be used as the second stage in a process of improving a cropping system after a complete prototyping process has been completed, as described by Vereijken (1997). Further research is needed to improve environmental diagnosis tools (Meynard *et al.*, 2002), to design indicators of fruit quality and to design crop models that are relevant to local contexts. But as it stands, the DISCS framework should enable stakeholders to target the decision-aid tools that are required for a specific issue, ensuring they are useful when and where they are actually needed, instead of seeking *a posteriori* for possible applications for the tools (Cox, 1996).

CHAPITRE 3

CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES PRATIQUES CULTURALES BASÉE SUR LA COMPARAISON A UN ITINÉRAIRE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE : PREMIÈRE ÉTAPE DE RECONCEPTION D'UN SYSTÈME DE CULTURE

Ce chapitre correspond à l'article soumis et accepté dans la revue *Fruits*, intitulé « Building a typology of cropping practices from comparison with a technical reference: First step for a relevant cropping system redesigning process- Results for tropical citrus production ». Son objectif est d'analyser les déterminants des pratiques culturales, la méthodologie est basée sur l'identification de combinaisons logiques et ordonnées des techniques culturales permettant d'expliquer les modalités constitutives du système de culture ceci dans le but de déterminer et de hiérarchiser, avec les acteurs, des objectifs d'amélioration de ce système de culture.

BUILDING A TYPOLOGY OF CROPPING PRACTICES FROM COMPARISON WITH A TECHNICAL REFERENCE: FIRST STEP FOR A RELEVANT CROPPING SYSTEM REDESIGNING PROCESS – RESULTS FOR TROPICAL CITRUS PRODUCTION

Fabrice Le Bellec^{1*}, Philippe Cattan², Muriel Bonin³, Amélie Rajaud⁴

¹ CIRAD-Persyst, UPR HortSys, TA B-103 / PS4, Blvd. de la Lironde, 34398 Montpellier Cedex 5, France, lebellec@cirad.fr

² CIRAD-Persyst, UPR Systèmes bananes et ananas, Stn. Neufchâteau, Sainte-Marie, 97130 Capesterre-Belle-Eau, France

³ CIRAD-ES, UMR TETIS, TA C-91 / F-Campus Int. Baillarguet, 34398 Montpellier cedex 5, France

⁴ CIRAD-Persyst, UPR HortSys, Stn. Bassin-Plat, BP 180, 97455 Saint-Pierre, France

Received 13 November 2010

Accepted 11 February 2011

* Correspondence and reprints

Fruits **66**, 143-159.

Abstract – Introduction. Farm typologies and cropping practice typologies generally aim at seeking determinants of existing crop management strategies. They constitute the first step for setting improvement goals for cropping systems. Though there are a host of farm typology methods, few deal specifically with farmers' practices, and even fewer investigate the correlations between practices. We propose here a framework for analysing the determinants of crop management, based on a vision of a crop management sequence condensed into logical combinations of cropping techniques. **Materials and method.** This analytical framework was applied to the case of Guadeloupian citrus production, using a representative sample of 41 producers. Three stages were necessary to implement our analytical framework. At stage 1, logical and ordered combinations of cropping practices (CCPs), constitutive of observed as well as reference crop managements (RCMs), were identified through expert analysis. Based on measurements of deviations between farmers' CCPs and RCMs' CCPs, a typology of cropping practices was next built. At stage 2, the performances of farmers' crop managements were evaluated using relevant indicators. Finally, at stage 3, constraints – either related to the environment or to the whole farm management – that determined producers' cropping practices were identified for making, with the stakeholders, proposals for further technical improvements. **Results.** Crop management sequences were condensed into five CCPs. A technical profile was then determined for every producer, before a multiple correspondence factorial analysis was run. It identified two groups of producers with contrasting technical profiles. The collective analysis of these results pointed out “weed management” as a major constraint on the cropping systems, revealing that the RCM was inadequate in a context of impossible mechanisation. **Discussion.** Restructuring complex sequences of cropping techniques into five logical combinations of techniques enabled the comparison with a reference crop management. The cropping systems' constraints and the objectives for further improvements were then set up collectively by the farmers and social stakeholders, along with the researchers. This analysis constitutes the first stage of a process of redesigning cropping systems, and its result provides a sound basis for a participatory approach.

France (Guadeloupe) / Citrus / systems analysis / cropping systems / cultivation / weed control / expert systems / participation / farmers

3.1. Introduction

The effects of agricultural practices in orchards very often exceed the scale of the plot, so it is necessary to take into account the expectations of other natural resource users (water utility companies, natural area administrators, etc.), particularly in terms of the environment (Meynard *et al.*, 2001). In response to these concerns, the objective of the national 'Ecophyto 2018' plan¹, set up by the French Ministry for Agriculture and Forestry, is to identify, design and disseminate low-pesticide production systems, so as to reduce pesticide use by 50% on French territory by 2018. This entails both reducing use of these products, and limiting the impact of those that remain essential to protect crops from parasites, weeds and diseases. This plan emphasises the necessity to "refocus and reactivate the innovation process" within a partnership between "all the research and development stakeholders", a prerequisite for implementing innovations in farms. How should this innovation be conceived to meet these objectives? The process of designing cropping systems is now well-established, and comprises three main stages: i) performing a diagnostic to determine the constraints and objectives of the cropping system to be improved, ii) generating innovative cropping systems in response to this first stage, and iii) evaluating these new cropping systems (Meynard *et al.*, 2001). We have focused our study on the first phase, to establish this constraint framework with a view to redesigning a cropping system.

An agronomical diagnosis evaluates a cropping system in relation to a defined innovation in performance (Loyce and Wery, 2006). Field typologies have been conceived to analyse an agricultural system on the regional scale, based on field investigations (Kostrowicki, 1977). Different methods exist to perform a typology, most of them being farm typologies (Valbuena *et al.*, 2008): they investigate characteristics and correlations on farms' structures and environment, on farmers and their practices. Such farm typologies may be aimed at bringing out the determinants of observed constraints on cropping practices, whether external or intrinsic to the farms. On the other hand, few typology methods deal with farmers' practices only. Existing typologies of practices generally seek correlations between one practice and the farm's characteristics or the environmental constraints (Knowler and Bradshaw, 2007; Wei *et al.*, 2009; Daskalopoulou and Petrou, 2002; Rapey *et al.*, 2001; Biarnès *et al.*, 2004; Lien *et al.*, 2010). However, all farmers' practices in a cropping system are linked with one another in an inclusive strategy, and should therefore be considered as a whole, in the form of a coherent crop management (Meynard *et al.*, 2001). How can one perform a typology considering groups of linked practices, rather than separate practices? To our knowledge, no relevant method is yet available.

We propose here to build a method for performing a typology of crop managements. Our hypothesis was that it is possible to model all different farmers' crop managements based on the comparison with a Reference Crop Management (RCM). Two steps were followed: i) each observed practice was separately compared with its correspondent in the RCM, and a degree of deviation from the reference practice was estimated; and ii) for each observed cropping system, correlations between the degrees of deviations of all practices were statistically investigated. The use of a RCM thus provided the necessary standard for comparative analysis. Our objective was to test whether an analysis of deviations of observed practices from a RCM's practices was able to identify the constraints of a cropping system with respect to its improvement.

¹ Ecophyto 2018, 2008, Available at: <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-2018,510#planECOPHYTO2018>.

Figure 3.1: Three stages were necessary to implement our analytical framework. Stage 1: identifying logical and ordered combinations of cropping practices (CCPs) of the reference crop management (RCM). Identifying typology of cropping practices by measurement of deviations between farmers' CCPs and the RCM's CCPs. Stage 2: using indicators to assess performance practices. Stage 3: determination of constraints. A farm typology completes the analytical framework providing information for interpreting the results from the statistical treatment.

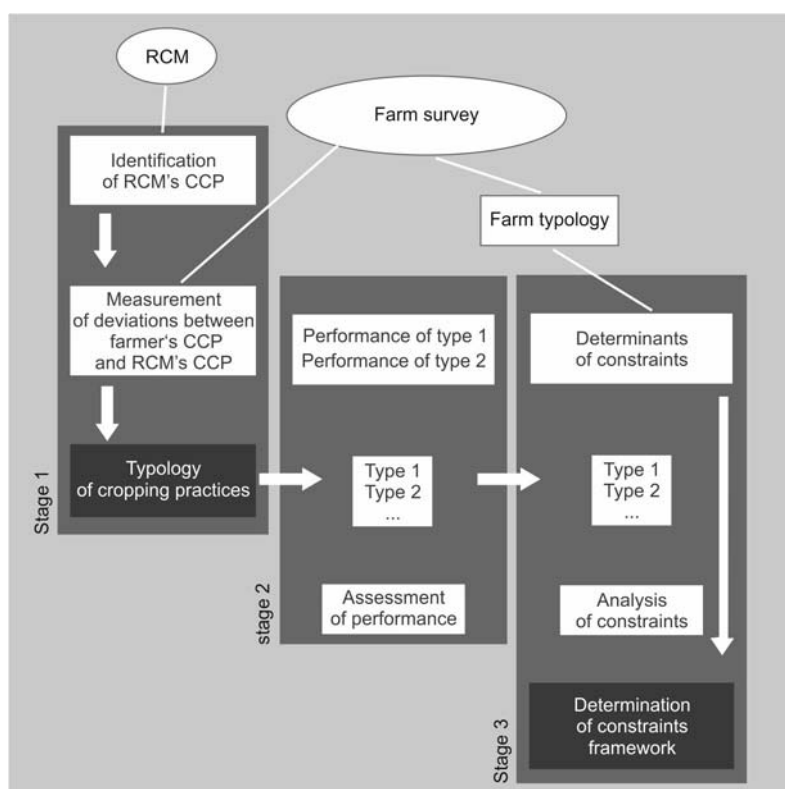


Table 3.1: The three main types of producer identified in the Beauvois (2006) farm typology. 'Citrus growers' (for whom citrus represent their main activity), 'dual producers' (characterised by the co-existence of two main agricultural activities, with citrus as a secondary diversification) and 'diversified' (characterised by at least three agricultural activities, with citrus as one diversification crop among the others).

Types of producer	Number of producers	Surface area of survey concerned (ha)
Citrus growers	11	60.2
Dual producers	15	32.6
Diversified	15	13.2

The diagnosis was completed with an investigation of the performances of the resulting crop managements (Loyce and Wery, 2006): simple performance indicators were accordingly selected in relation to the low-pesticide issue.

Finally, the crop management typology provided a discussion support for collectively formalising the crop management's "constraint framework", the basis for the following step of the cropping system redesigning process (Meynard *et al.*, 2001).

This analytical framework was used at the first stage of an improvement process for citrus cropping systems in Guadeloupe (French West Indies). The citrus industry coexists alongside the archipelago's conventional export industries (sugarcane and banana). Its importance has been recognised and supported as a priority of the Guadeloupe rural development programme (PDR-FEADER¹, 2007–2013) in order to enable this production to cover the demand of the local market, which is still mostly covered by imports. Alongside this development, however, producers must move their activity towards a reduction of inputs, in accordance with the national objectives of the 'Ecophyto 2018' plan. These environmental concerns had been anticipated since 1998 by the citrus growing sector. In particular, cropping practices based on the principles of integrated fruit production had been disseminated by citrus producers (Le Bellec *et al.*, 2005) and formalised by a reference crop management (De Roffignac, 2008). However, these cropping practices were described and propagated regardless of their validation by the farmers, who nevertheless had to cover the task of implementing them. With these new national prerogatives, we considered it necessary to check whether the cropping practices applied by Guadeloupe's citrus growers ultimately corresponded to those recommended, and how any deviations observed could be explained. We applied our analytical methodology with the ultimate goal of defining a framework of constraints and improving citrus cropping systems, with a view to meeting the objectives of pesticide use reduction through suitable cropping practices.

3.2 Materials and methods

Three stages were necessary to implement our analytical framework (*figure 3.1*). Prior to starting an analysis of practices, a preliminary farm survey was conducted among the population of farmers concerned. A farm typology was built on farms' structures and strategic criteria. At stage 1, logical and ordered combinations of cropping practices (CCPs), constitutive of observed as well as reference crop managements (RCMs), were identified through expert analysis. Based on measurements of deviations between farmers' CCPs and RCMs' CCPs, a typology of cropping practices was next built. At stage 2, the performances of farmers' crop managements were evaluated using relevant indicators. Finally, at stage 3, constraints – either related to the environment or to the whole farm management – that determined producers' cropping practices were identified. The farm typology provided information for statistical interpretation of the results (*figure 3.1*: stage 1).

¹ Rural Development Programme - European Agricultural Fund for Rural Development.

Table 3.2: Synthesis of the reference crop management (RCM) based on the technical recommendations propagated since 1998 among citrus producers in Guadeloupe (De Roffignac, 2008).

Cropping operations	Requirements	Objectives or effects sought	Examples of execution
Planting decision	Adhere to the ecological requirements of the desired crop	Establish natural development conditions for the crop	Selecting a sunny plot
Soil analysis	Obligatory	Rectify deficits in the crop's requirements	Physico-chemical analysis
Plot management	Perform the operations necessary according to the constraints encountered	Create optimum cropping conditions	Creating a drain in the case of a hydromorphic zone
Basal fertilising	Fertilise according to the recommendations (soil analysis results)	Adjust fertilisation to requirements	Input organic material if measured content is too low
Choice of trees	Adhere to the recommendations: rootstock and variety	Adhere to crop ecological and technical requirements	Use of a rootstock/variety combination tolerant to the tristeza virus
Tree planting	Adhere to the planting densities according to the species, variety and ecology	Adhere to crop development promoting air circulation in the plot	For orange trees: 5 x 7 m if altitude less than 300 m
Installation of irrigation network	Install a supplementary irrigation system, according to the ecology	Meet the crop's water requirements	Installing an irrigation network (drip system) in dry ecology
Shape pruning	Perform the necessary shape pruning	Promote high-quality fruit production, and limit phytosanitary risks	Pruning trees to the desired shape based on 4 master branches
Regular pruning	Perform regular pruning every year	Promote high-quality fruit production, and limit phytosanitary risks	Eliminating low branches on the tree
Fertilisation	Apply the recommended doses according to tree age, split the inputs	Meet the crop's requirements and limit risks of fertiliser leaching	Input the annual recommended dose in 4 goes
Irrigation	Apply the recommended doses according to tree age	Meet the crop's requirements to prevent excessive stresses	Spraying in dry season
Phytosanitary treatments	Treat if necessary after monthly phytosanitary monitoring	Limit and rationalise pesticide use	Applying anti-mealybug treatment if 5% presence threshold on sample is exceeded
Weeding	Weed under the tree foliage	Limit competition for water and fertilising elements between the tree and weeds. Maintain perennial plant coverage between the rows to limit erosion.	Manual or chemical weeding located under the tree
Harvest	Harvest at right stage of maturity, size and sort the harvest.	Promote production of high-quality fruits	Harvests split over time

3.2.1 Preliminary farm survey and farm typology

A farm survey was conducted among Guadeloupe's citrus producers in 2006 (Beauvois, 2006). It was based on semi-directive interviews conducted on the farm premises, and supplemented by a visit to the citrus plots. Citrus growers that owned an orchard of at least 0.5 ha (*i.e.*, 150 to 200 trees) were interviewed. Cross-referencing of various administrative and technical databases (DAF¹, Chamber of Agriculture and CIRAD²) enabled the identification of 90 citrus producers. A sub-sample of 41 producers was selected for detailed investigation, representative of the diversity of the ecological zone and the surface area criteria. In the end, the total citrus surface area of all the farms surveyed was 106 ha, *i.e.*, 28% of Guadeloupe's citrus growing surface area, estimated at 382 ha (General Agricultural Census, 2008). Three-quarters of the surface area planted with citrus of the surveyed sample are geographically located on the "leeward coast", the traditional zone for fruit arboriculture in Guadeloupe.

The resulting farm typology (Beauvois, 2006) was based on two main variables: the citrus surface area cultivated with citrus, and the main agricultural products (banana, sugar cane, vegetable, citrus, etc.). Three types of producers (*table 3.1*) were identified, evenly distributed in the surveyed population: 'citrus growers' for whom citrus represent their main activity; 'dual producers', characterised by the co-existence of two main agricultural activities, with citrus as a secondary diversification; and 'diversified producers', characterised by at least three agricultural activities, with citrus as one diversification crop among the others.

The farm survey covered a total of 57 variables, to be used for the following cropping practice analysis (*figure 3.1*: stage 1) then for crop management constraint analysis (*figure 3.1*: stage 3). These variables may be ordered into two groups:

- the more technical 15 variables of a first group were used to analyse the cropping techniques associated with citrus growing,
- the more structural 42 variables of a second group were used to analyse the constraints of the cropping systems; these variables related to the operator, the activities carried out on the farm, the labour employed, the equipment level, the physical description of the system studied, etc.

3.2.2 Stage 1. Analytical framework of crop management: measurement of deviations between the cropping practices encountered and a reference crop management (RCM)

First, the reference citrus crop management (RCM) (De Roffignac, 2008) was synthesised (*table 3.2*). Then, in order to facilitate comparisons between the observed and reference crop management, the crop operations of this RCM were reorganised into logical and ordered combinations of cropping practices (CCPs). The aggregation process was based on expert advice and on bibliographic cross-referencing (Flint, 1991; Grisoni, 1993; Davies and Albrigo, 1998; Le Bellec and Le Bellec, 2007). For each CCP, it was estimated whether an observed crop management complied or not with the reference.

¹ DAF: Directorate for Agriculture and Forestry

² CIRAD: Centre for International Cooperation in Agricultural Research for Development

A set of binary decision-making rules (observed / not observed) or more complex decision-making rules (using a decision tree) was used to evaluate the compliance of observed crop managements' CCPs with the RCM. For each variable in a CCP, the observed practice scored 1 if it complied with the reference, and 0 otherwise. Hence each producer was attributed a five-score profile reflecting the extent of their observance of the RCM.

Setting the CCP's deviations from the reference as bi-modal variables for analysis, a multiple correspondence factorial analysis (MCFA) was performed (using the software R¹ and the 'Ade4' specific factorial analyses library). Logical links among CCPs were thus outlined.

3.2.3 Stage 2. Evaluation of crop management performances

Two levels of performance were expected from citrus crop managements: on the one hand, to secure high yields and quality of fruit, and on the other hand, to achieve the national objectives for reducing use of pesticides ('Ecophyto 2018' plan¹). Two indicators were selected accordingly: one to evaluate tree health (a guarantee of tree profitability) and another to evaluate the level of pesticide use.

3.2.3.1 An indicator for evaluating the state of tree health

The indicator I_{Health} used rated an orchard's trees' health on a qualitative scale from 0 to 1: 0 for dying or dead trees; 0.2 for neglected trees in a poor sanitary state; 0.4 for trees in a poor sanitary state, but receiving appropriate treatments; 0.6 for partly neglected trees in an average sanitary state and nonetheless bearing marketable fruits; 0.8 for trees in a satisfactory state, with some minor phytosanitary problems; 1 for trees in a highly satisfactory state. This assessment was performed by the surveyor during the plot visits.

3.2.3.2 A treatment frequency index for evaluating the level of pesticide use

A treatment frequency index (TFI) was adopted according to the recommendation of the 'Ecophyto 2018' plan. It was calculated as follows: $TFI = \sum [(DA \times S^2 \text{ treated}) / (DH \times S^2 \text{ plot})]$, where DA is the "dose applied" to the plot, DH the minimum approved dose per ha, and S^2 the treated and total surface areas of the plot. A TFI for herbicides ($TFI_{\text{herbicides}}$) was calculated separately from the TFI for other phytosanitary treatments ($TFI_{\text{treatments}}$) so as to facilitate the following crop practice analyses.

3.2.3.3 Analysis of correlated crop practice performances

Relationships between the indicators' results and the observed deviations from combinations of cropping practices (CCP) were sought for using χ^2 tests (software R⁵). Correlations with the indicators' results were tested first for each CCP, then for grouped CCPs.

¹ R: A language and environment for statistical computing, R Dev. Core Team, R Found. Stat. Comput., Vienna, Austria, 2008, <http://www.R-project.org>.

3.2.4 Stage 3. Collectively building the constraint framework

3.2.4.1 Statistically analysing the crop management constraints

Relationships between the second group of variables from the survey (see 3.2.1) and the performance indicators (see 3.2.3) or the observed deviations from CCPs (see 3.2.2) were sought for using statistical tests for non-parametric data, *i.e.*, χ^2 and Kruskal-Wallis tests, using the software R©. The correlations found pointed out determinants of cropping practices, and hence the crop management constraints.

3.2.4.2. Collective proposals for cropping system improvement

Based on the constraint analysis of the cropping systems, we determined their main limiting factors (Loyce and Wery, 2006). The results were fed back to the surveyed producers (20 of whom attended the report meeting) (Le Bellec *et al.*, 2006) for validation. Once validated, the results of the analysis provided a discussion support for two different groups of stakeholders – a group of public stakeholders and a group of professional stakeholders – who decided on the improvements that were to be made to the current cropping systems. Our aim in involving the stakeholders was to create a dynamic group that would in the long term facilitate the adoption of new practices (Wei *et al.*, 2009).

The group of public stakeholders comprised six representatives of the citrus growing sector: a producer, a researcher, a consumer, a representative of professional training, a representative of the agriculture and forestry services (DAF) and a natural area administrator from the Guadeloupe National Park. This group studied and ranked the system constraints, and co-opted two new stakeholders (one representative of a cooperative marketing structure, and one representative of the health professions) to supplement its representativeness. The ensuing discussions defined the priorities to be assigned to improving the cropping systems in order to reduce pesticide use and define its evaluation indicators.

These conclusions were used as a lead-in for the second group, the so-called professional stakeholders, comprising six other people: three citrus producers, representing the three main types of producers defined by the Beauvois (2006) typology, one technician from an agricultural support structure and two researchers. Based on a formalised constraint framework, improvements were discussed with these professional stakeholders, with a view to redesigning the cropping systems step by step.

Table 3.3: Simplification of reference crop management into five logical and ordered combinations of cropping practices. A simple set of decision-making rules (compliant/non-compliant) or a more complex set of rules (decision tree, figures 2 to 4) is used to analyse whether the combinations of cropping practices comply with the reference crop management (citrus orchards, Guadeloupe, FWI).

Combinations of cropping practices derived from aggregation of the reference crop management	Aggregated cropping operations of the reference crop management (table 3.2)	Survey data considered	Decision-making rules for compliance analysis of combinations of cropping practices
1. Cropping conditions	'Planting decision', 'Plot management', 'Installation of irrigation network' and 'Irrigation'	Agro-ecological zone, drainage, topography and irrigation.	Decision trees: (figure 3.2 and 3.3)
2. Population management	'Choice of trees' and 'Tree planting'	Agro-ecological zone, density, variety and rootstock	Observed / not observed
3. Tree management	'Shape pruning and regular pruning', 'Basal fertilising' and 'Fertilisation'	Pruning (shape and regular), soil analysis, fertilisers and splitting of fertilisation	Observed / not observed Decision tree: (figure 3.4)
4. Weed management	'Weeding'	Weed management	Observed / not observed
5. Phytosanitary management	'Phytosanitary treatments'	Phytosanitary damage and products used	Observed / not observed

Figure 3.2: Decision tree built following expert advice to determine whether the “cropping conditions” combination of cropping practices is observed or not observed in the case of a plot located in a wet ecological zone.

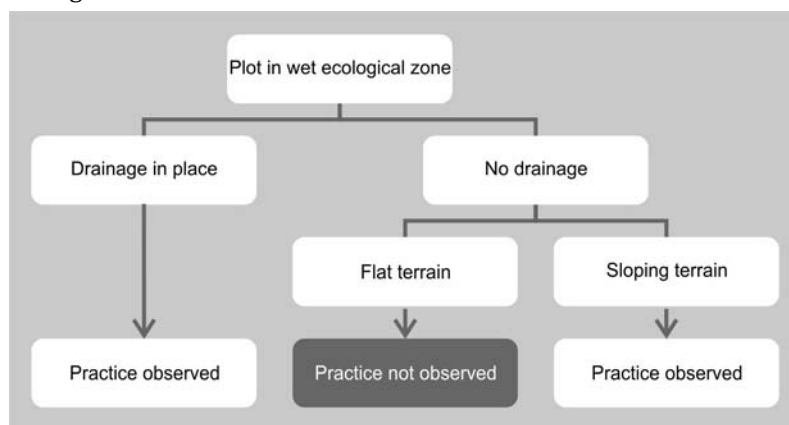
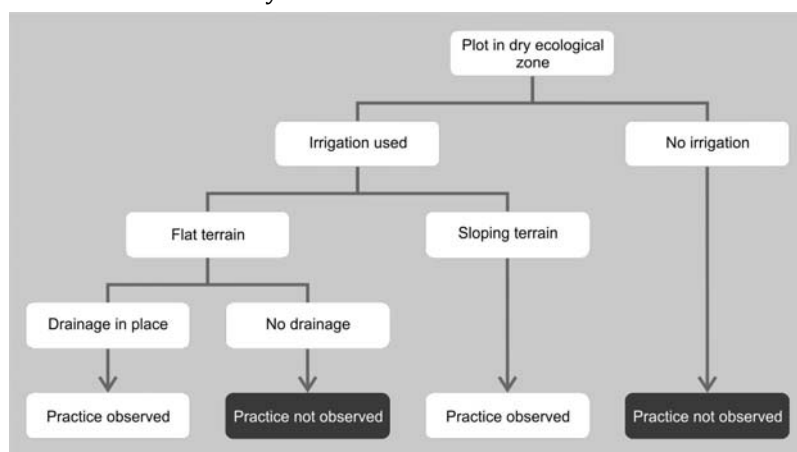


Figure 3.3: Decision tree built following expert advice to determine whether the “cropping conditions” combination of cropping practices is observed or not observed in the case of a plot located in an ecological zone with a marked dry season.



3.3 Results

3.3.1 Stage 1. Analytical framework of crop management

3.3.1.1 Defining and comparing observed CCPs with the RCM

Based on the Reference Crop Management (RCM) synthesis (*table 3.2*), five Combinations of Cropping Practices (CCPs) were identified as coherent sets of practices essential for sound citrus orchard management (*table 3.3*).

- “Cropping conditions” reflected the level of land management required for each cropping zone. Dry and wet ecological zones were considered separately.
- “Population management” considered the planting densities and their suitability for the species, variety and rootstock planted, and the plantation’s altitude. It evaluates, for a given agro-ecological zone, the potential production of the plant population within a plantation. Here, altitude is a key variable, since the cropping zone is characterised by a significant altitude variation [(0 to 500) m] due to its location on the slopes of the Soufrière Volcano massif.
- “Tree management” considered two main cropping operations: tree pruning and fertilisation. This CCP evaluated the supply of fertilisers throughout the orchard’s lifetime, as well as the optimisation of allocation of assimilates to the reproductive part (role of pruning).
- “Weed management” considered the methods of managing invasive weeds. This CCP is focused on limiting competition between weeds and the trees.
- “Phytosanitary management” considered the relevance of phytosanitary products used according to their targets.

Binary rules or decision trees were used to evaluate the compliance of each observed CCP with the corresponding reference CCP. The general philosophy guiding this evaluation was that of rational agriculture: optimising population growth conditions according to the agro-ecological zones, and making rational use of phytopharmaceutical products (treatment with the right product, at the right dose, at the right moment).

With regard to the “cropping conditions”, the orchards studied were all located in a wet tropical climate, while enjoying the Foehn effect of the leeward coast; hence, they must withstand alternating periods of heavy precipitation and periods of water shortage. Therefore, compliance with the RCM for this CCP gives priority to water supply optimisation: removal of potential excess water by drainage and control of water input by irrigation to compensate for water shortages in periods of drought. Hence, the decision trees were built taking into account the conditions relating to the cropping zone, drainage, topography and irrigation of the orchard (*figures 3.2, 3.3*).

Figure 3.4: Decision tree built following expert advice to determine whether the fertilisation component of the “tree management” combination of cropping practices is observed. If basal fertilising was not applied, we deemed that the reference crop management was not observed.

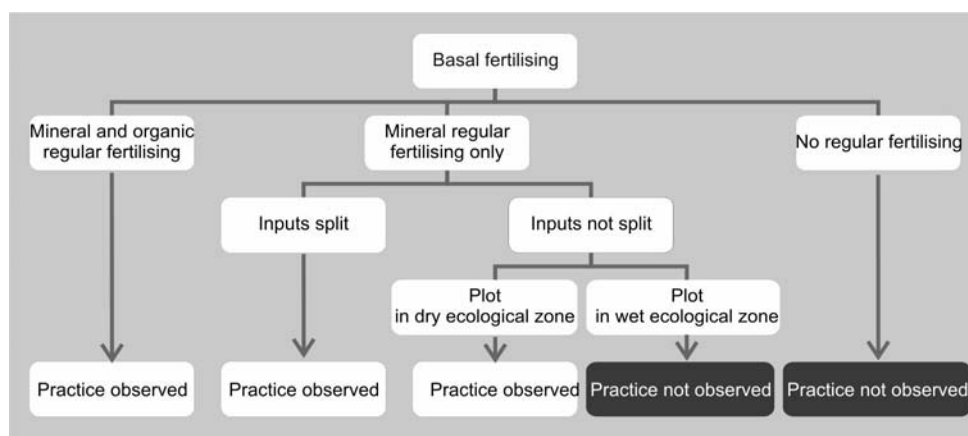
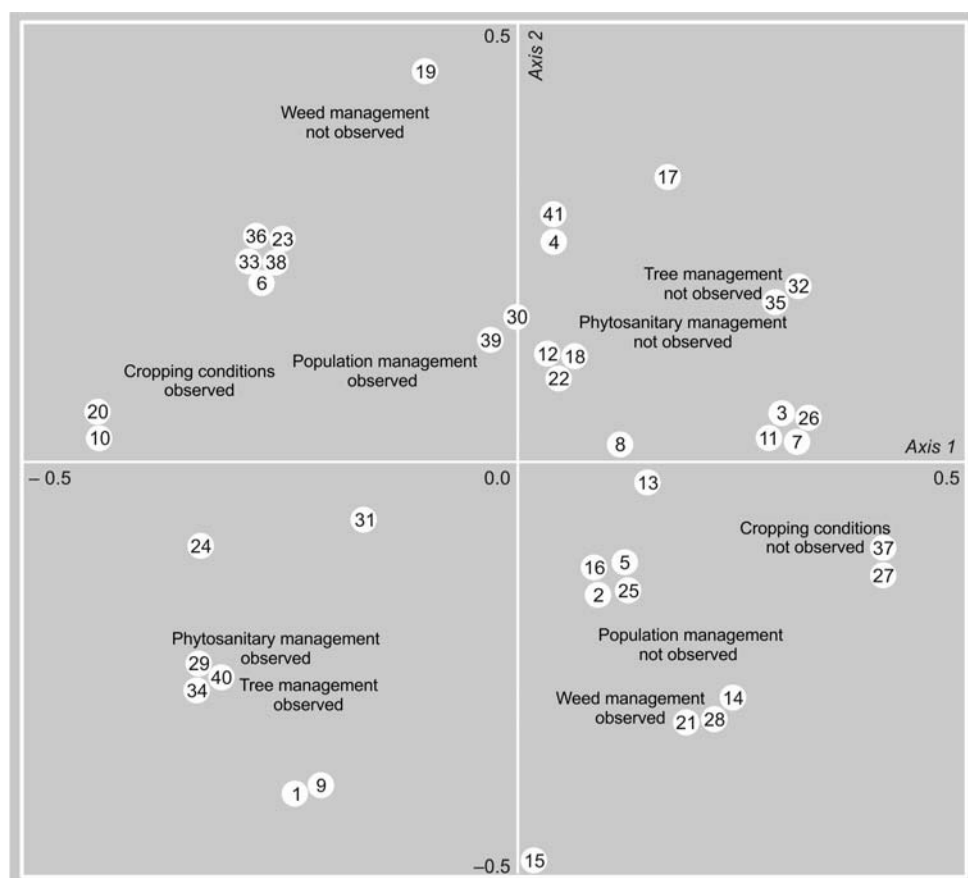


Figure 3.5: Graphic representation of the multiple correspondence factorial analysis. The individuals (41 surveyed producers) are represented by numbers, and the observed or not observed combinations of practices are noted. The observed combinations of cropping practices contrasted with the non-observed combinations on axis 1, except for “weed management”, which proved to be inverted on this same axis. “Weed management” contributed to more than 50% of the construction of axis 2.



The compliance of “population management” was evaluated using a binary decision rule: failure to observe at least one of the recommendations in terms of density, species composition, variety or rootstock, according to the plantation’s altitude, was regarded as non-compliance for this CCP. It was considered that the absence of just one of the conditions was enough to prevent the citrus population from achieving optimum production for its cropping zone.

The combination of “tree management” practices was evaluated separately for the fertilisation and the tree pruning variables. Compliance with the reference for the fertilisation variable was assessed based on a decision tree (*figure 3.4*): quantitatively (presence of basal fertilising and regular fertilising), and by a principle of availability over time (input of organic fertiliser mineralising over time, or split inputs). For tree pruning aspects, a binary rule (observed / not observed) was applied. Finally, the combination of “tree management” practices was deemed compliant if both cropping practices (tree pruning and fertilisation) were found to comply with the RCM.

The combination of “weed management” practices was evaluated by a binary rule (observed / not observed). In this case, the priority was to limit competition for water and fertilising elements between the trees and weeds. Consequently, localised weeding (whether chemical or manual) under the tree was deemed obligatory, and the potentially negative impact on the environment of a use of herbicide was not taken into account. Hence, three types of management complied with the RCM rules: mechanical management (mowing); manual management; and mixed management with mechanical weeding between the rows, and chemical weeding along the row or around the trees. These three practices could be used alone or in alternation.

Finally, “phytosanitary management” was graded as observed if the producer provided a suitable technical solution for the type of phytosanitary damage encountered. Hence, this method was also evaluated by a simple decision-making rule (observed / not observed). Therefore, the priority for evaluation was given to management of phytosanitary products used by the farmer, and not directly to the environmental impact of practices, considering only the types, doses and frequencies of the products used, and hence the evaluation factors in the correct use of the products, rather than their environmental impact.

3.3.1.2 Deviation from the reference crop management as the basis for a typology of crop management

According to our survey, observance of the combination of cropping practices (CCPs) by the producers surveyed varied from 39% for the “*phytosanitary management*” aspect to 63% for “*population management*”, while it proved that the other CCPs were followed in just one out of two cases on average (*table IV*). The multiple correspondence factorial analysis (MFCA) revealed links among the five identified CCPs. Axes 1 and 2 (*figure 3.5*) explained 52% of this representation.

Figure 3.6: Three-dimensional representation of the multiple correspondence factorial analysis. Projection of individuals (41 surveyed producers); group A: producers observing at least three out of four combinations of cropping practices (excluding “weed management”); group B: producers observing fewer than three out of four combinations of cropping practices (excluding “weed management”). The individuals are not all visible, since some profiles are perfectly superimposed.

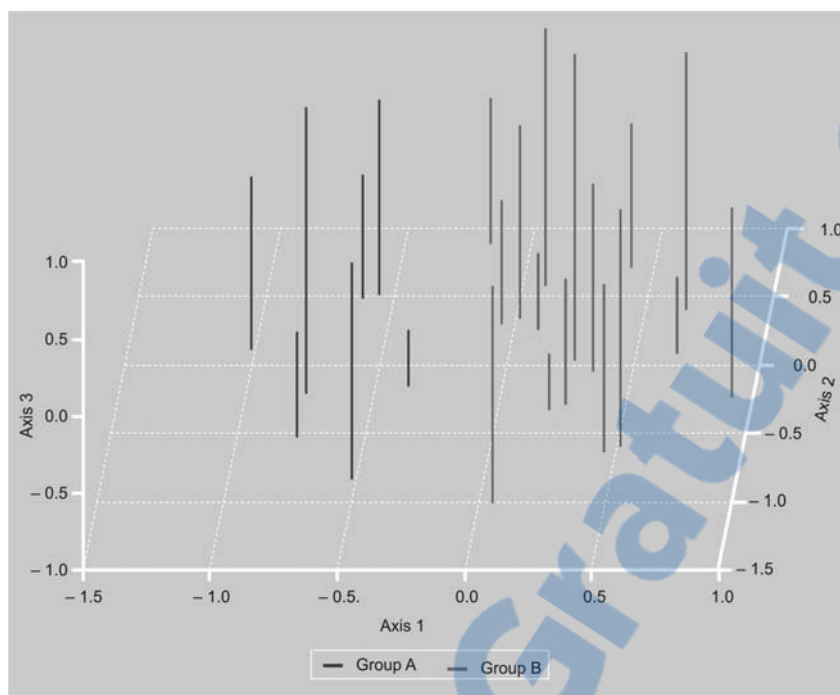
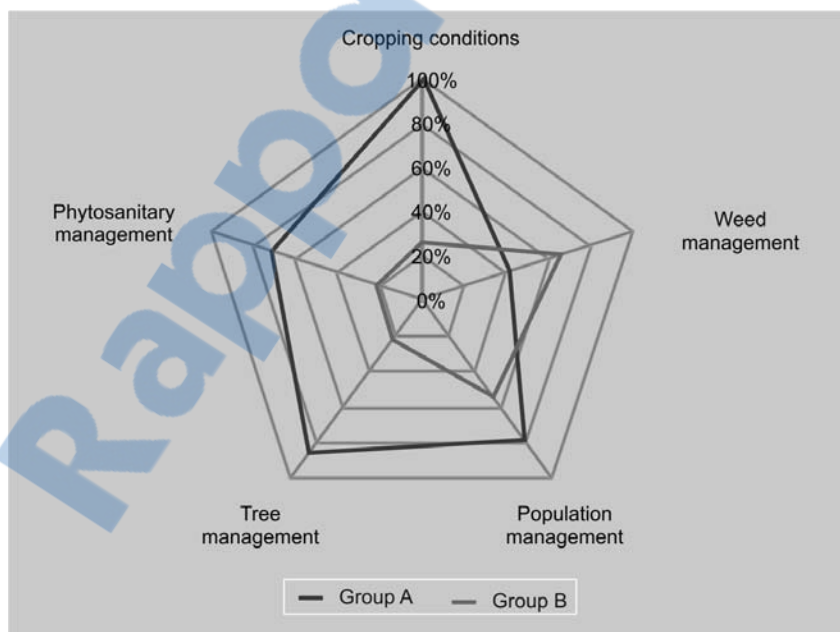


Figure 3.7: Crop management profiles of producers of groups A and B. Group A: producers observing at least three out of four combinations of cropping practices (“weed management” was excluded from this classification given the results of the multivariate analysis), and group B: producers observing fewer than three combinations of cropping practices. The frequencies of the five combinations of cropping practices correspond to the observance of the practice.



On the representation of the MFCA (*figure 3.5*), axis 1 may be qualified as an “investment” axis. Two CCPs (“cropping conditions” and “population management”) alone contribute to nearly 70% of the construction of this axis. These CCPs represent the investment made by the producers in their plantation, such as installing irrigation or drainage networks, but also the observance of planting distances. For axis 2, “weed management” alone explains nearly 50% of the axis.

This type of analysis logically contrasts the ‘observed’ or ‘not observed’ characteristics of a practice. It was found that the ‘observed’ characteristics of four out of the five combinations of practices were grouped together, and therefore contrasted with their ‘non-observed’ characteristics (*figure 3.5*): these were cropping practices directly relating to citrus cropping (“cropping conditions”, “population management”, “tree management” and “phytosanitary management”). The ‘observed’ or ‘non-observed’ characteristics of “weed management”, however, proved to be inverted (*figure 3.5*). That is to say, producers who most observed the citrus cropping practices appeared to least observe “weed management” and *vice versa*.

By considering “weed management” separately from the other CCPs, we formed two groups of producers – those who observed at least three out of the four CCPs (group A), and those who observed fewer than three CCPs (group B) (*figure 3.6*). The profile of the CCP followed by these two groups was illustrated graphically (*figure 3.7*). The diagram obtained enabled us to represent the contrasts of CCPs for these groups.

If we exclude “weed management”, the adoption of the RCM by the group A producers varied from 71% (“phytosanitary management”) to 100% (“cropping conditions”). However, for group A, “weed management” was observed in fewer than one out of two cases (42%), which contrasts it with group B, for which this practice was better observed (67%). In total, group A comprised 14 producers who answered our survey (representing 62 ha), while 27 producers (44 ha) came under group B.

3.3.2 Stage 2. Evaluation of cropping practice performances

3.3.2.1 Impacts of cropping practices on tree health

Considered individually, none of the five combinations of cropping practices (RCM) revealed an influence on tree health. However, we observed a positive influence on this indicator when at least three out of four CCPs (excluding “weed management”) of the RCM were observed ($I_{\text{health}} \geq 0.8, p = 0.005$). This verified the performance of the RCM in terms of tree health.

3.3.2.2 Impacts of cropping practices on pesticide use

The group A producers applied treatments more often ($\text{TFI}_{\text{treatments}} = 3.42 \pm 2.82$) than the group B producers ($\text{TFI}_{\text{treatments}} = 2.25 \pm 1.91; p = 0.050$), with an average $\text{TFI}_{\text{treatments}}$ of 2.65 (± 2.29). There was no significant difference between the two groups for $\text{TFI}_{\text{herbicides}}$.

The average $TFI_{\text{herbicides}}$ was 2.19 (± 1.71). It varied from 0 to 3 between each farm. Furthermore, the annual authorised dose of the main active ingredient used, glyphosate at $2880 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ (Couteux and Lejeune, 2008), was not observed by nearly 2/3 of producers. In order to observe this regulation, the TFI value for glyphosate should be less than 1.33. These quantities of herbicides applied do not correspond to overdosing practices, but to increased frequencies of use, extended to the entire plot. The surface areas affected by this practice were high, covering 67% of the surveyed surface area.

3.3.3 Stage 3. Collectively building the constraint framework

3.3.3.1 A typology to analyse the cropping system constraints

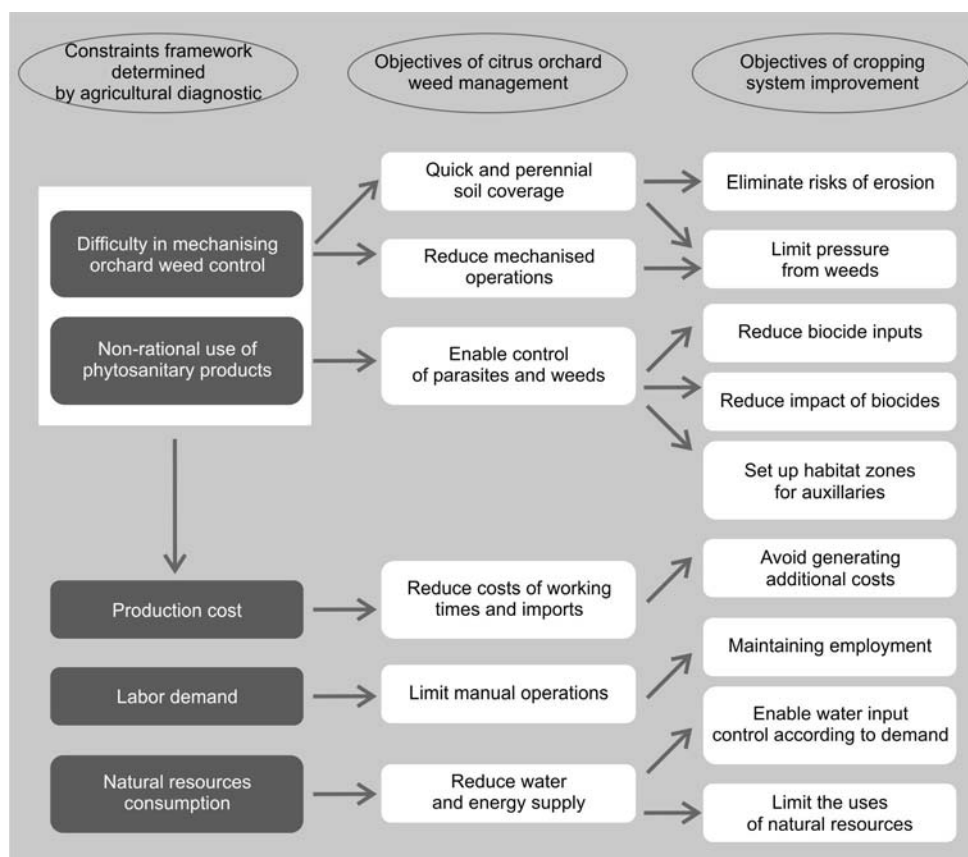
From our survey, the appropriation of the reference crop management (RCM) for citrus by the producers appeared to be only partial, and dependent on two types of constraints. The first type of constraint involves the lack of specific citrus growing skills and/or investment in this crop. Three main correlations between deviations from the combinations of cropping practices (CCPs) and the explanatory variables from the survey were outlined: i) the relation between “phytosanitary management” and undergoing specific training in integrated fruit production was demonstrated, since this practice was better managed by trained producers ($p = 0.011$), ii) mismatches between the active ingredient used and the target (diseases or pests) was primarily encountered in group B producers ($p = 0.001$); this could be explained by a transposition of technical knowledge from another crop (banana, vegetables, etc.) to citrus; and iii) the importance allocated by the producers to their citrus crops played a predominant role in observance of the RCM: group A primarily comprises “citrus growers” (see *table 3.1*), whose main activity is citrus cropping; there is a significant difference in affiliation between them and “dual producers” ($p = 0.024$).

The second type of constraint involves the weed management conditions. Hence, the $TFI_{\text{herbicide}}$ appeared to be high if we consider the active ingredient used (glyphosate) and its regulations. It appeared that exceeding the authorised dose is not linked to overdosing practices but to a high number of applications during one year. This may be correlated with the abundance of weeds in the tropical cropping conditions, with a permanently high pressure. Another explanatory factor is the topography. The citrus plots are frequently planted on slopes ($> 15\text{--}20\%$) with protruding rocks, where any heavy mechanisation is impossible. So it appears that mechanical weed management is difficult, which leads to the use of chemical herbicides ($p = 0.0044$). Under these conditions, “weed management” is a cropping practice subject to environmental constraints.

3.3.3.2 Proposal for improvement of the cropping system, in a multi-stakeholder partnership

The first constraint outlined by our analysis demonstrated the need for improving the phytosanitary management of the orchard (fighting parasites, including weeds). This first constraint does not call for new techniques for fighting parasites, since relevant ones are already described in the reference crop management (RCM). It seems, though, that citrus growers lack technical instructions.

Figure 3.8: Constraint framework for citrus cropping system improvement in Guadeloupe. From the constraint framework (and its consequences), we deduced with the stakeholders the ideal objectives of orchard weed management, and then the improvement objectives for the cropping system.



However, the second identified constraint, the difficulty of plot mechanisation, will not be so “easily” solved. The current RCM fails to propose relevant low-herbicide weeding techniques for steep fields. Based on these conclusions, the public stakeholders sorted out three improvement objectives for an innovative citrus cropping system, to be recommended in Guadeloupe: i) reduce herbicide use in the system, ii) develop a more eco-friendly cropping system, in particular by reducing phytosanitary treatments; both of which should also make it possible to iii) promote high-quality fruit production to distinguish domestic citrus production from imported products. Weed management seems to be the keystone for this improvement of the cropping system, with the aim of limiting phytosanitary inputs. In line with the professional stakeholders, the constraint framework for this improvement was drawn up, defining the objectives for designing new cropping systems (*figure 3.8*). While the advantages of rational weed management have been understood by the stakeholders (particularly in the promotion of perennial soil coverage to prevent erosion, or setting up habitat zones for beneficial arthropods), some collateral effects of these system improvement solutions have already been identified. Expected new constraints, such as higher production costs or competition for water between the cash crop and the weeds, will have to be taken into account in the following step of the redesigning process.

3.4 Discussion

The first original aspect of the agricultural diagnosis performed here was the use of a reference crop management as a basis for observed cropping practice analysis. So as to further facilitate the analysis, all agricultural practices were condensed into only five combinations of coherent cropping practices, while simple decision-making rules such as “IF condition, THEN decision” were used to attribute a specific cropping practice profile to every producer. Coupled with two relevant evaluation indicators, these standardised practice profiles were efficiently submitted to a statistical analysis that enabled identification of the constraints of the citrus growing systems in Guadeloupe. This methodological approach seems to be sufficiently generic to be applied to other cropping systems, provided that the knowledge of the experts for the system in question can be rallied.

The relevance of the indicators used for facilitating the interpretation of the diagnostic was particularly important (Loyce and Wery, 2006). We chose to use the treatment frequency index (TFI) recommended by the French public services¹ for evaluating agricultural practices and their evolution. This index is indisputable in terms of precision in that it counts the number of active ingredient doses used, but it only reflects the intensity of use of phytosanitary treatments without taking into account the specific characteristics of each phytosanitary product, such as its behaviour in the environment, its solubility, its volatility, its ecotoxicity for the environment, etc. It also does not take into account the environment-specific vulnerability for pesticide use, which depends on pedology or hydrogeology features. The final results provided by the diagnostic will depend on the choice of evaluation indicators (answering only the questions they were asked for). Consequently, while these indicators are indeed necessary for comparing cropping systems and for making the appropriate decisions for achieving the pre-defined objectives (Mitchell *et al.*, 1995; Giupponi, 1998; Nolot and Debaeke, 2003), their selection or construction, in conjunction with the stakeholders concerned, seems to be an essential task.

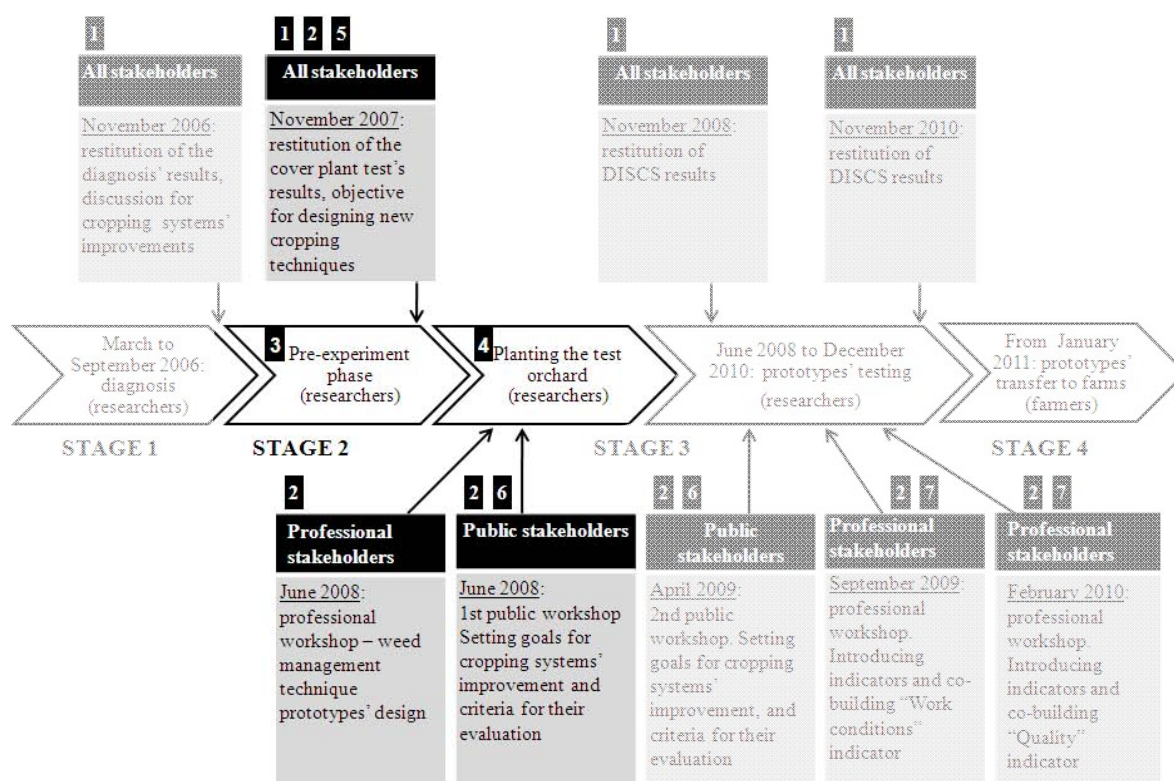
Our analytical framework has enabled us to identify the constraints encountered by farmers with regard to pre-determined objectives, in our case reducing pesticide use. Once these constraints have been revealed, there could subsequently be many ways to undertake the redesign of the cropping system. There are many examples of approaches, and the degrees of involvement of the stakeholders differ greatly from one method to another. Girard (2006), for example, involves the stakeholders very early in his construction approach, at the diagnostic stage. For our part, we chose to call in the stakeholders only after the constraint-determining stage, but before the constraints had been ranked. Our approach enabled us to: i) rank the various identified constraints with the public stakeholders (industry and society representatives), and determine with them the improvement objectives for the cropping system concerned, and ii) determine a constraint framework to meet these improvement objectives with the professional stakeholders (research and development stakeholders). In our approach, the public stakeholders uphold the interests of society, as each member of which is a spokesman of the entity they represent as well as a consumer. Each of these stakeholders logically protects their interests, but in a group of this sort, none of them is predominant. Hence it is the group as a whole which, through a process of negotiations, comes up with solutions that must be shared by all. Therefore, it is essential to ensure a well-mixed group, in order to prevent decisions too centred in the field of competence of particular stakeholders.

The constraint framework determined with the professional stakeholders was then used as an initial set of specifications for developing a new trial cropping system. Discussions within our second group of more professional stakeholders (farmers, technicians and researchers) were able to harness the expert knowledge of the producers, and set it against the knowledge of the technicians and researchers. Such knowledge is often a source of innovation (Darré, 2006; Oliver *et al.*, 2010). While we tried to reach consensus, in particular to achieve apparently realistic technical solutions, this joint construction process could curb “a more innovative innovation”. The constraint framework developed then enabled us to achieve a more precise definition and ranking of the improvement objectives of the previously evaluated cropping system, in order to (i) implement agricultural practices aiming to achieve these objectives, and (ii) evaluate the degree of achievement of these objectives based on criteria pre-defined by a multi-criteria analysis, for instance. This methodology, derived from Vereijken’s work (1997), seems particularly well suited to redesigning cropping systems, especially via the necessary multi-disciplinary and participative approach required by this type of work. Specifically, and for our case study of citrus cropping in Guadeloupe, this step-by-step redesign methodology of a cropping system led to the construction of four weed management prototypes. In the second phase of our work, these prototypes will be studied in a field trial with a systemic approach employing decision-making rules decided in conjunction with the professional stakeholders.

Acknowledgements

We would like to express our warm thanks to all the producers, technicians and other stakeholders of the citrus growing sector in Guadeloupe for their extensive involvement in this work. We thank Andrea Pain for her linguistic support. This work received financial support from the European Union (EAFRD - European Agricultural Fund for Rural Development), and from the French State (ODEADOM), as well as the support of the Guadeloupe Region.

Figure 2.2 (rappel) : Chronogramme de l'application de la méthode DISCS.



CHAPITRE 4

CO-CONSTRUCTION DE PROTOTYPES EXPÉRIMENTAUX DE GESTION DE L'ENHERBEMENT POUR LES VERGERS D'AGRUMES EN GUADELOUPE

La figure 2.2, reproduite sur la page ci-contre, resitue les différentes étapes de l'application de la méthode DISCS. Ce chapitre 4 correspond aux phases 3 et 4 de ce chronogramme. Notre démarche de co-construction des prototypes de gestion de l'enherbement a été synthétisée dans le chapitre 3 (section 3.3.3.2), nous en donnons ici les détails en développant les différentes étapes nécessaires à cette construction.

Nous débuterons ce chapitre (section 4.1) par un état de l'art de la gestion de l'enherbement des vergers ; nous distinguerons deux types d'enherbement liés à l'origine spontanée ou semée de la flore qui les compose. Les principaux atouts et contraintes de ces enherbements seront détaillés ; nous introduirons alors le concept de 'plante de services'.

La section suivante (4.2) correspond à une phase pré-expérimentale durant laquelle nous avons sélectionné une plante de services pour répondre à un objectif de gestion de l'enherbement des vergers sans possibilité de mécanisation compte tenu de cette contrainte identifiée lors du diagnostic. Cette section correspond à l'article accepté dans *Procedia Environmental Sciences* qui fait suite au congrès de EECA (Ecological Engineering: from Concepts to Applications International Congress, 2-4 Décembre 2009, Paris, France), intitulé « *Using cover crops to enhance ecological services in orchards : a multiple criteria and systemic approach applied to tropical areas* ». Recherchant une généricité d'approche, ce travail a été partagé avec l'équipe du PRAM¹ confrontée à cette même problématique de gestion de l'enherbement.

La section 4.3 restitue les différentes étapes de la construction des prototypes et leurs descriptions.

La section 4.4 détaille le dispositif expérimental de la phase 4 du chronogramme.

¹ PRAM : Pôle Régional d'Agro-écologie de Martinique, unités 26 et 103 du CIRAD

Rapport-Gratuit.com

4.1. La gestion de l'enherbement en verger

4.1.1 Tactiques de gestion des adventices en verger

Les espèces végétales composant l'enherbement naturel des vergers d'agrumes sont considérées comme des adventices lorsqu'elles entrent en compétition avec les arbres notamment pour l'eau, les nutriments, la lumière ou bien lorsqu'elles contribuent à l'hébergement de parasites (Fischer & Jordan, 1991). Le niveau de compétition dépend de l'adventice, de sa densité mais aussi de la tolérance de l'arbre qui elle-même est liée à son âge. Les jeunes agrumes sont plus sensibles que les arbres adultes (Davies & Albrigo, 1994). Ces facteurs de risque de compétition conditionnent les pratiques de gestion de l'enherbement en verger d'agrumes dans le monde entier qui se résument bien souvent à une gestion mécanique (mulching ou labour) ou chimique (herbicide) ou bien encore une combinaison de toutes ces pratiques (Davies & Albrigo, 1994). Celles combinant la limitation de l'enherbement par mécanisation (Mathais & Filho, 2005 ; Mas *et al.*, 2007 ; Yang *et al.*, 2007) et le désherbage chimique sur la ligne de plantation, offre généralement les meilleurs résultats en terme de rendement (quantité et qualité de fruits). Cependant, ces pratiques ne sont pas sans impact sur l'environnement d'une part compte tenu de l'utilisation d'herbicides chimiques et d'autre part vis-à-vis des risques d'érosion du sol notamment s'il y a labour. Les problèmes de pollution des eaux souterraines liés à une utilisation banalisée et parfois abusive des herbicides (Novotny, 1999) encouragent l'étude et la recherche de solutions alternatives de cette gestion de l'enherbement. Différentes stratégies, observées dans les systèmes de culture appelés 'low-external-input', se donnent donc comme objectif la diminution voire la suppression des herbicides et mettent en œuvre pour cela de véritables tactiques écologiques (Anderson, 2005 ; Liebman & Davis, 1999 ; Gerowitt, 2003). Ces pratiques se nourrissent parfois de l'expérience de l'agriculture biologique où les herbicides chimiques sont interdits (Bond & Grundy, 2001). Les enjeux communs de ces managements écologiques des adventices sont la réduction des intrants à la parcelle, la préservation du sol et de sa biodiversité, la lutte contre l'érosion, etc. Si dans l'élaboration de ces stratégies la rotation culturale est une pratique prépondérante (Teasdale *et al.*, 2004), cette dernière est difficilement applicable en verger d'agrumes en Guadeloupe où les pentes et l'empierrement des parcelles limitent les possibilités de mécanisation de ce type de pratique culturale.

4.1.2 L'enherbement en verger, les plantes de services

Différents types de matériel végétal peuvent être utilisés pour l'enherbement (annuelles ou pérennes, graminées ou légumineuses...) et l'on peut distinguer différents types d'enherbement de par leur origine semée ou spontanée. Le maintien d'un enherbement des vergers peut avoir de nombreuses répercussions positives sur le système sol, la plante, l'environnement et les services écologiques qu'il peut ainsi procurer. Pratiquement abandonné suite aux développements des herbicides sur les systèmes de culture viticoles, l'enherbement des inter-rangs est, par exemple, à nouveau promu, en particulier dans les vignobles septentrionaux ou irrigués (Ripoche, 2009). L'enherbement peut dès lors être apparenté à une seconde culture car il modifie fortement la structure du système biophysique et particulièrement la composante sol.

La présence de ce couvert peut modifier les états de surface du sol et par conséquent le ratio ruissellement/infiltration ayant pour avantage de réduire les risques d'érosion (Gagliano *et al.*, 2008) mais aussi les transferts de pesticides dans les eaux de surface (Louchart *et al.*, 2001). Cette modification des états de surface peut aussi avoir un impact positif sur la portance du sol et permettre de réduire les conséquences des passages d'engins (Ripoche, 2009). Ces effets positifs peuvent être contrebalancés par des effets négatifs notamment vis-à-vis des compétitions pour les ressources du sol comme l'eau et les nutriments (azote). Les plantes composant l'enherbement peuvent en effet puiser dans les ressources du sol et appauvrir ainsi les horizons explorés par le système racinaire de la culture de rente. Ces compétitions pour les ressources hydriques et azotées qui découlent de ces mécanismes peuvent avoir des conséquences importantes pour la croissance des arbres (Davies et Albrigo, 1994 ; Grisoni, 1997 ; Wright *et al.* 2003), notamment dans leur phase juvénile durant laquelle le système racinaire est encore superficiel (de 0 à 3 ans). Les arbres adultes explorent les horizons plus profonds du compartiment de sol, ils sont de ce fait moins sensibles à ces compétitions ; du moins, la croissance et la production de fruits, semblent moins affectées (Le Bellec *et al.*, 2010b).

Dans le cas d'une gestion d'un enherbement spontané, les stratégies de gestion peuvent se résumer à gérer les contraintes, notamment en jouant sur les pratiques culturales pour minimiser les impacts (Ripoche *et al.*, 2010) tout en 'récoltant' les bénéfices. Dans le cas d'un enherbement semé, outre la gestion de ces mêmes contraintes, des services spécifiques sont recherchés. Dans les vergers, de nombreuses associations ont été testées à travers le monde. Ces études répondent soit à des objectifs uniques soit à une prise en compte globale de l'influence de l'enherbement sur la culture fruitière associée.

La lutte contre des ravageurs telluriques ou l'étude des enherbements comme plantes hôtes de ravageurs ou au contraire d'auxiliaires sont souvent les premières raisons des études spécifiques, même si l'utilisation de légumineuses pour leur intérêt de plantes amélioratrices est souvent un préalable. Par exemple, Lapointe *et al.* (2003) ont mis en évidence le pouvoir de toxicité de *Tephrosia candida* (Fabaceae) sur les larves de *Diaprepes* spp. dont la larve affecte considérablement les racines des agrumes. Autre exemple, négatif cette fois, *Arachis glabrata* (Fabaceae) est reconnue comme plante hôte de nématodes phytophages (Macchia *et al.* 2003) ; ces études spécifiques sont généralement réalisées au laboratoire.

Au champ, les études enherbement/verger sont orientées vers la lutte contre les adventices (Gutierrez *et al.* 2002 ; Matheis *et al.*, 2005) et/ou l'érosion ou encore comme plantes améliorantes, à humus (Godefroy, 1988 ; Charpentier *et al.*, 1999 ; Wright *et al.*, 2002 ; Da Silva *et al.*, 2002). Les objectifs communs de ces travaux sont d'étudier l'impact de ces enherbements sur le rendement du verger. Selon les écologies, les associations et les années (influence directe de la pluviométrie d'une année à l'autre), les impacts sur le rendement varient mais restent globalement positifs dans les conditions de culture non limitées par la ressource en eau. Au Brésil par exemple, *Canavalia ensiformis* (Fabaceae, annuelle et semée chaque année durant 5 ans) a permis d'augmenter les rendements d'un verger d'oranger de près de 60 % (De Carvalho *et al.*, 2002), mêmes hausses de rendement significatif observées à Cuba avec *Stylosanthes* (Fabaceae) associé à des orangers (Borrotta-Perez *et al.*, 2001) ou encore en Chine avec *Trifolium* (Fabaceae) associé au kaki (Jiang-XiaoJun, 2003). Dans tous les cas les enherbements sont constitués de légumineuses.

A contrario, le témoin sol nu offre parfois les meilleurs rendements, comme par exemple en Arizona où un *Trifolium* (Fabaceae) a été associé à des limettiers et des orangers ; les auteurs attribuent ces différences de rendements à une concurrence par rapport à l'eau (Wright *et al.*, 2003), mêmes observations en Australie avec *Arachis* (Fabaceae) associé à des macadamia (Firth, 1995). Cette compétition pour l'eau constitue probablement la contrainte la plus importante de la gestion de l'enherbement des vergers qu'il soit spontané ou semé.

Comme les impacts d'usages répétés d'herbicides sont loin d'être sans conséquence sur l'environnement, sur la santé de l'agriculteur (Matheis & Victoria, 2005) mais aussi sur la rentabilité de la culture (coût des produits phytosanitaires) (Carvalho *et al.*, 2003), généraliser un enherbement pérenne dans les vergers semble être, dans ces conditions, indispensable. Cependant, la difficulté de mécanisation des vergers d'agrumes en Guadeloupe réduit les choix et tactiques de gestion de l'enherbement. Nous développons, dans la section suivante, une méthodologie pour sélectionner une plante de couverture du sol dont le premier service recherché sera de maîtriser l'enherbement spontané des vergers sans recours à la mécanisation.

4.2 Choosing cover crops to enhance ecological services in orchards: a multiple criteria and systemic approach applied to tropical areas

Lesueur Jannoyer M.¹, Le Bellec F.², Lavigne C.¹, Achard R.³, Malézieux E.^{4*}

¹ CIRAD Unité HortSys, Pôle de Recherche Agroenvironnementale de la Martinique, Petit Morne, BP214, Le Lamentin 97285, Martinique

² CIRAD Unité HortSys, 830 route du Bouchu, Vieux Habitants, 97119, Guadeloupe

³ CIRAD Unité Systèmes Bananes et Ananas, Pôle de Recherche Agroenvironnementale de la Martinique, Petit Morne, BP214, Le Lamentin 97285, Martinique

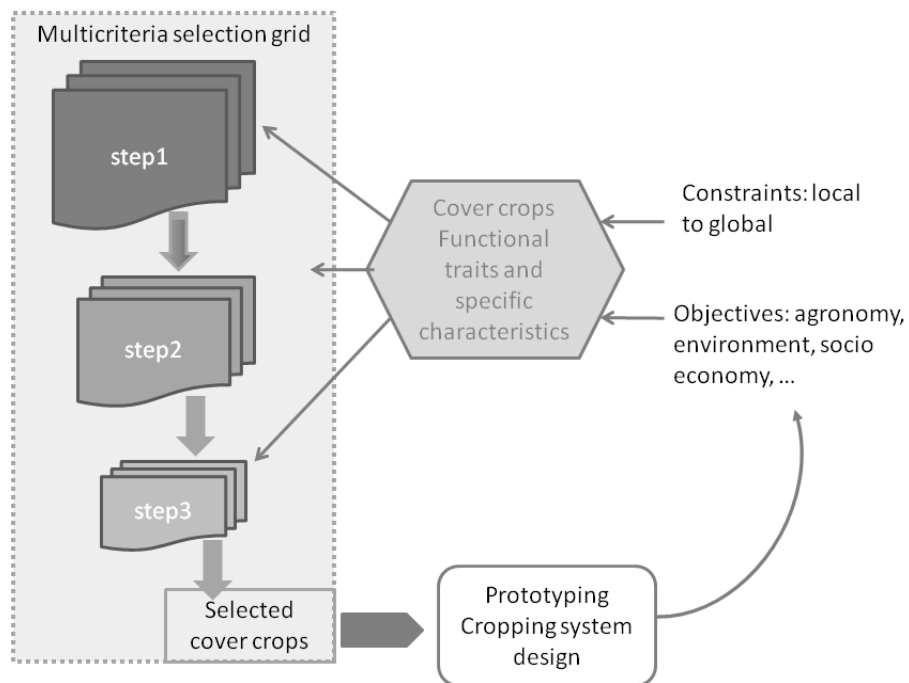
⁴ CIRAD Unité HortSys, TA-B103 PS4, Boulevard de la Lironde, Montpellier 34398, France

* Corresponding author

Procedia Environmental Sciences, In press.

Abstract. Conventional agriculture is based on a high level of chemical inputs such as pesticides and fertilisers, leading to serious environmental impacts, health risks and loss of biodiversity. In both temperate and tropical agricultures, the reduction of pesticide use is a priority for intensive agricultural systems such as orchards. Reintroducing biological diversity in single crop cropping systems can enhance biological regulations and hence contribute to reduce or eliminate the use of chemicals and to provide additional services such as run-off and erosion control. In tropical wet areas, weed control is crucial but difficult to manage without herbicides especially when orchards are not located in easily mechanised areas and when labour force is costly. Cover plants are a plant component that can be easily introduced in orchard systems and could prove to be efficient in weed control and other functions. Based on this assumption, we developed a specific approach for the choice of adapted cover plants in single crop orchards to control weeds and provide additional ecological services. The approach was undertaken on citrus orchards in the French West Indies. A multi criteria evaluation grid was built to select an “optimal” cover crop. In both Martinique and Guadeloupe, 202 species were first selected in the local flora, and tested on vegetative characteristics. Specific criteria were secondly defined relating to seed availability (limitation of alien species introduction), farm constraints and regulations (no invasive species). Specific features were then determined according to the agronomic potential and ecological services for an optimal cover plant. Criteria included weed control, the ability to control runoff and erosion, water and nutrient competition, pests and natural enemies hosting capacity. The whole evaluation grid combines data from literature, expert assessment and experimental measurements. Optimum cover crop functional groups were defined according to the considered agrosystem and associated objectives in each case. In Guadeloupe, a participatory approach led first to the selection of Fabaceae (*Neonotonia wightii*) characterized by high auxiliaries hosting services. These services were assessed using a bio-indicator (family of phytoseiidae). In Martinique, the need for a high covering index associated with a low biomass production led to the selection of grasses: *Urochloa mozambicensis* and three *Paspalum* species. The multicriteria grid can be used as a generic tool to select cover plants and can be easily adapted to apply to various cropping systems. Its use for banana cropping system is currently in progress. However, the concept of an optimal single cover plant remains difficult to achieve and the elaboration of a multi-specific cover system is often required to reach the desired efficiency.

Figure 4.2.1: General approach to select and integrate cover crops in cropping system, applied to orchards in tropical wet area



4.2.1 Introduction

In conventional horticulture, the level of chemical inputs such as pesticides and fertilisers is high, leading to serious environmental impacts¹, health risks² and loss of biodiversity (Krebs *et al.*, 1999). In the European Community, the reduction of pesticide use is a priority for intensive agricultural systems such as orchards³ and ⁴. Reintroducing biological diversity in single crop cropping systems can enhance biological regulations (Altieri, 2002; Malézieux *et al.*, 2009) and hence contribute to control the bioagressors in the agrosystem (Moonen and Barberi, 2008) to reduce or eliminate the use of chemicals (Simon *et al.*, 2009) and to provide additional services such as run-off and erosion control (Duran Zuazo and Rodriguez, 2008).

Weed control is one of the most significant constraints that producers face in tropical wet environments. It requires, in most cases, large quantities of herbicides as weeds are hard to control in integrated production systems (Bertrand and Doré, 2008). How can weeds be managed in orchards with minimal herbicide use? Maintaining weeds as a free ground cover, ie natural vegetation, results in high orchard management constraints and high competition with the crop (Sillon *et al.*, 2000). The most obvious way to control a ground cover is by mechanical mowing or by brushcutting, but these mechanical practices become difficult when orchards are located in sloping or rocky areas and when labour force is costly (Lavigne *et al.*, 2007). We hypothesised that introducing selected cover plants, ie planned biodiversity, can efficiently control weeds in orchards. In order to test this hypothesis, we set up a method to choose the cover plants species that achieve specific criteria and combine functional ecological traits and agronomical characteristics. The aims were to promote bioregulations, to decrease the use of pesticides and, more generally, to provide ecological services, even if the biodiversity of the system is reduced compared to orchards with natural cover.

Our cover crop selection scheme was based on a systemic approach, attempting to find an ideal type of cover crop integrating specific functional traits (Barber and Navarro, 1994; Chen *et al.*, 2004), taking into account ecological, agronomical and socio-economical constraints and objectives. Our approach consisted of a grid construction structured by different selection steps according to specific criteria. The ranking and conditions within the selected criteria were defined with the producers for orchards in the selected areas according to the targeted agronomic and ecological services sought for the innovative cropping system and specific farm constraints (such as labour). When this multicriteria assessment was fruitful, our final aim was to enhance and design innovative cropping systems that include cover plants as a component. Our general approach is detailed in figure 4.1.1.

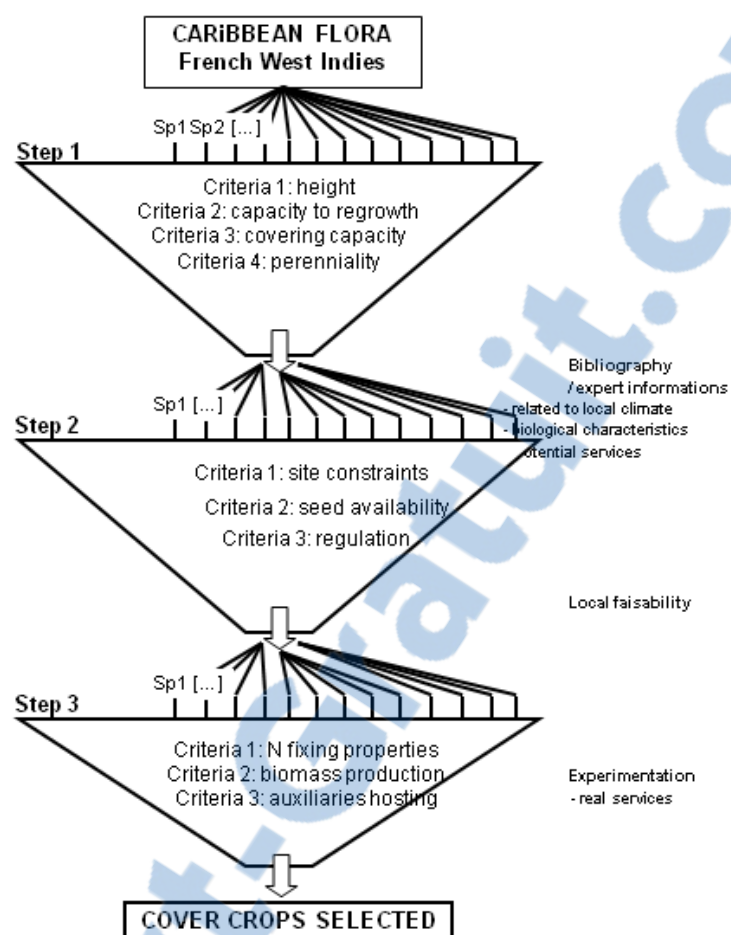
¹ IFEN, 2006. available at : www.ifen.fr/uploads/media/eau_ree2006_01.pdf

² Commission of the European Communities SEC(2005) 1399 75

³ Commission of the European Communities, COM (2006)372 13

⁴ Ecophyto 2018, 2008, Available at: <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-2018,510#planECOPHYTO2018>.

Figure 4.2.2: Multicriteria selection grid with the detailed screening steps for orchards



4.2.2 Material and method

4.2.2.1 Multicriteria grid construction

Potential cover crops were screened according to 3 successive steps (figure 4.1.2). Each step proceeded in binary choice: if the criteria objective was achieved, the cover crop was selected for the next step, if not it was rejected off the grid. Criteria are based on previous research, experts' assessment (scientists, technical staff and producers), agronomical experiments, and eco-physiological measurements. Core material, i.e. potential plant biodiversity, was taken from the floristic inventory/stocktaking of the area (Fournet, 2002) that identifies 3200 plant species in both Guadeloupe and Martinique, the Tropical Forages database¹ that identifies 180 species of tropical cover crops and the AFRIS FAO website² that characterizes cover crop species.

The first screening step of the grid consists in a selection on vegetative characteristics: plant height (<50cm), capacity for re-growth (fresh biomass/ha 30 days after mowing), covering capacity (covering rate normalized by CEB (Commission des Essais Biologiques) (Marnotte, 1984) and perennality (ability to maintain on the long term). The perennality was considered as an important objective because in an orchard the aim is to achieve a permanent cover crop during several fruit tree cycles and to avoid annual seedling operation.

The second step integrates criteria of practicability: seed availability (market access), regulations (non invasive species only) and specific farm constraints (labour demand, labour cost, etc.).

Step 3 of the selection takes into account the desired ecological services: capacity for weed competition (% cover / soil covering rate after sowing), N fixing properties (nodules presence and activity), potential auxiliary or pest hosting (ecological family trait), and biomass production (fresh biomass/ha). To implement step 3 of the selection grid, experiments were carried out both in Guadeloupe and Martinique (detailed in 4.1.2.2). The criteria ranking could differ from one cropping system to another, according to the sought objectives.

4.2.2.2 Multi criteria grid use

We tested two different agro-ecological environments: a tropical area with a dry season of 3-5 months and non mechanized citrus orchards in Guadeloupe (Le Bouchu, Vieux Habitants) and a tropical wet area with mechanized citrus orchards in Martinique (Rivière Lézarde, Saint Joseph).

The global objectives of the introduction of cover crops in both situations were to compete with weeds but not with productive trees, to reduce or eliminate herbicide use and to facilitate orchard management (vehicle traffic and impact on soil, N symbiotic assimilation, auxiliary hosting, etc.).

¹ Tropical forages website: www.tropicalforages.info/

² AFRIS: Animal Feed Resources Information System, <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/AFRIS/default.htm>

Table 4.2.1: Selected cover crops for orchards in both Guadeloupe and Martinique, end of step 2, in bold common species

<i>Guadeloupe</i>	<i>Martinique</i>
<i>Fabaceae</i>	
<i>Arachis pintoï.</i>	<i>Aeschynomene americana</i> L.
Krapov. & W.C. Greg	<i>Alysicarpus ovalifolus</i> (S. et Th.) Leon
<i>Desmodium</i>	<i>Centrosema pascuorum</i> Mart. ex Benth.
<i>adscendens</i> (Sw.) DC.	<i>Chamaecrista rotundifolia</i> (Pers.) Greene
<i>Desmodium intortum</i> (Mill.) Urb.	<i>Crotalaria juncea</i> L.
	<i>Crotalaria spectabilis</i> Roth
	<i>Dichondra repens</i> J.R.Forst. et G.Forst. (<i>Convolvulaceae</i>)
	<i>Macroptilium</i> <i>bracteatum</i>
	http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Macroptilium_bracteatum.h
	tm(Nees & Mart.) Marechal & Baudet
	<i>Pueraria phaseoloides</i> (Roxb.) Benth.
	<i>Stylosanthes capitata</i> Vogel
	<i>Stylosanthes guyanensis</i> (Aubl.) Sw
	<i>Macroptilium atropurpureum</i> (DC.) Urb.
	<i>Neonotonia wightii</i> (Wight & Arn.) J.A. Lackey
	<i>Stylosanthes hamata</i> (L.) Taubert
<i>Poaceae</i>	
	<i>Brachiaria decumbens</i> Stapf.
	<i>Buchloe dactyloides</i> (Nutt.) Engelm.
	<i>Paspalum notatum</i> Flügge cv <i>Common</i>
	<i>Paspalum notatum</i> Flügge cv <i>Pensacola</i>
	<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack.
	<i>Urochloa mozambicensis</i> (Hack.) Dandy
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers

4.2.2.3 Guadeloupe experiment

To implement step 3 of the selection grid, field trials were first conducted in 2007 in Guadeloupe, at the CIRAD experimental station, (Station “Le Bouchu”, Vieux-Habitants, Guadeloupe, 16°03' N 61°45' W, altitude 24 m) (fluvisol, FAO classification; 2.5% organic carbon (OC); distribution of particle size: 34% clay, 23% silt, 43% sand). The climate is tropical with an annual rainfall average of 1000 mm and a dry season from January to April. Seven cover crops (table 4.1.1) were assessed in individual plots (3 m x 3 m, with 3 replicates) from September 2006 to August 2007. The best plant was selected according to its weed control efficiency and its adaptability to environmental conditions (tolerance to dry season). The weed control efficiency was assessed through recovery rate dynamics and ability to compete with weeds, which was expressed by species richness. When species richness is high, weed control is poor. Recovery rate was estimated visually; it was assumed to be a surface equivalent to the vertical projection of the above ground parts of the plants onto the ground surface and was expressed as a percentage (Le Bellec *et al.*, 2009).

4.2.2.4 Martinique experiment

To implement step 3 of the selection grid, an experiment was conducted in 2008 Martinique, at the CIRAD experimental station (Station “Rivière Lézarde”, Saint Joseph, Martinique, 14°39' N; 60°59' W, altitude 52m) (andic nitisol FAO classification, 3.2% organic carbon (OC); distribution of particle size: 66% clay, 13% silt, 16% sand). The mean annual rainfall is 2400 mm with a dry season from February to April.

Issued from step 2, 24 cover crops were assessed in individual plots (2.5m x 2.5m, with 3 replicates) from April to December 2008. Green biomass and the covering rate 70 days after sowing were measured to account for the competition with citrus and weed control: when green biomass is high ($> 20 \text{ t ha}^{-1}$) competition with trees is high, when recovery rate is low (cover percent $< 55\%$) weed control is poor. We also measured the capacity of cover crop to regrow after mowing (fresh biomass 30 days after mowing, t ha^{-1}), its final height (cm), the root biomass (total fresh biomass t ha^{-1}) and the root depth. These parameters were used to assess other functional or agronomical traits: the ability of the herbaceous stratus to resist to mowing (and thus its perennality) and to support vehicles and human traffic in the orchard, and the species' performance in improving soil structure and mobilizing deep soil nutrients for the main crop.

Figure 4.2.3: 4 cover crops evaluation in field trial in Guadeloupe: (a) *Cynodon dactylon*, (b) *Neonotonia wightii*, (c) *Macroptilium atropurpureum*, (d) *Stylosanthes hamata*. Grey bars: specie richness (number of present species); black line: cover rate (%). (b) was the selected cover crop.

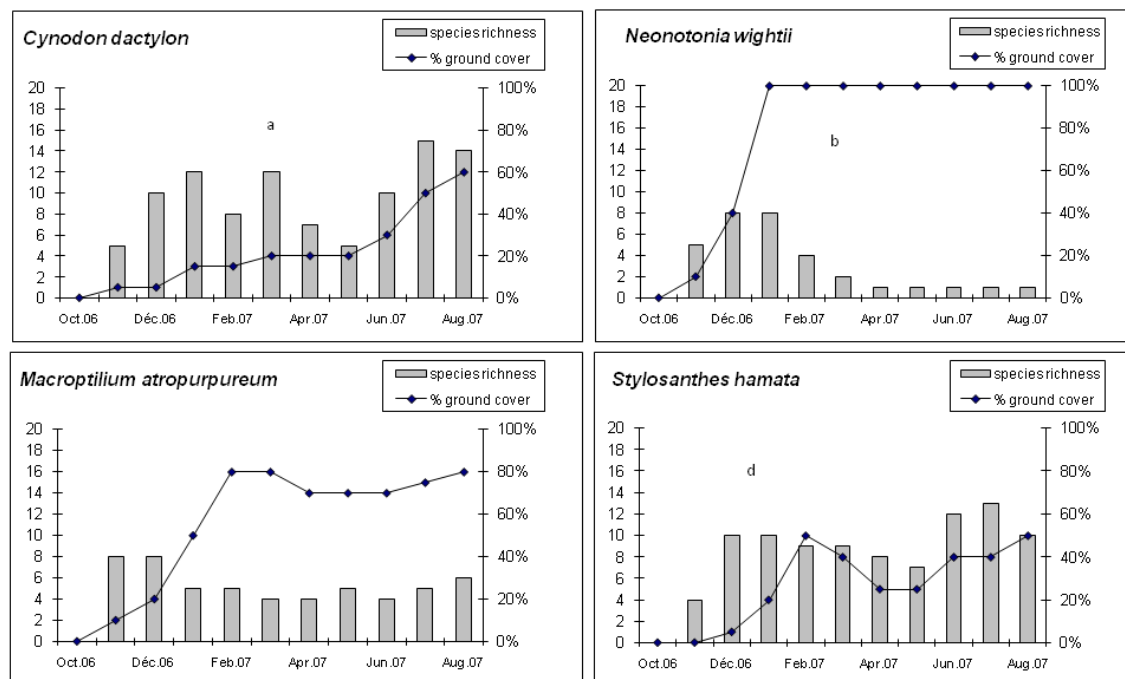
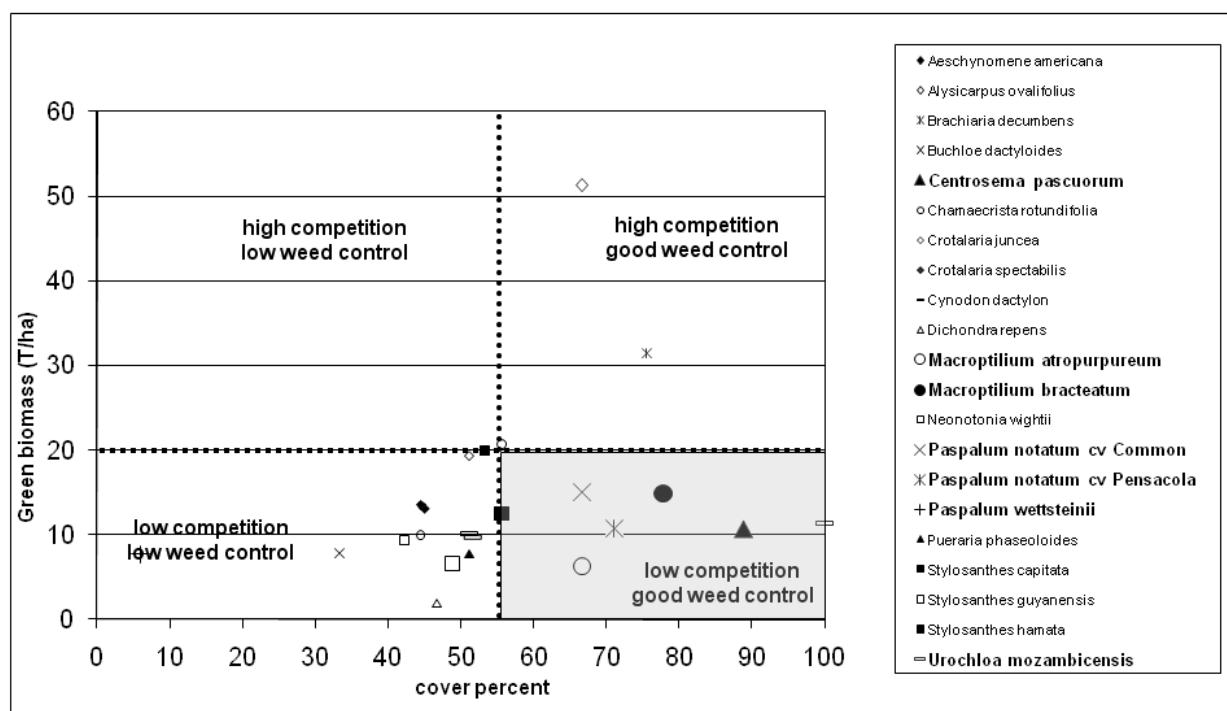


Figure 4.2.4: 24 cover crops assessment with experimental measurements in Martinique: covering rate (%) and green biomass production ($T\ ha^{-1}$), the grey area is the cover crops selection area



4.2.3 Results and discussion

4.2.3.1 Step1

The 3200 species of Caribbean flora (Fournet, 2002) were screened in step1 according to their ecological adaptability (temperature), their perenniality and their height (< 50cm). 202 species were thus considered as potential cover crops for our objectives. We completed this first step with criteria from the Tropical Forages website and with information from the AFRIS FAO web site. Crossing references and experts' information led to the selection of 53 species¹ in Guadeloupe and 80 species in Martinique, mainly grasses and legumes (from *Fabaceae* and *Poaceae* species in particular). The selected species were herbaceous and perennial plants, which were described as long-term pasture (>4 years), by their stem habit (creeping, prostrate), and their ecological adaptation (temperature, shade environment and soil pH requirements).

4.2.3.2 Step2

Seed availability on the international market led us to screen in the field the behaviour of 24 species in Martinique (13 *Fabaceae*, 10 grasses, 1 *Convolvulaceae*), and 7 species in Guadeloupe (6 *Fabaceae*, 1 grass) taking into account the cover crop management and farm constraints (no mechanical control) (table 4.1.1).

4.2.3.3 Step3

The objective was to maximize services and minimize competition between the cover crop and citrus trees. In Guadeloupe, step 3 consisted in the test and selection of cover crops according to their ecological and agronomical adaptability to water stress (dry season resistance) and weed control capacity (figure 4.1.3). The high capacity to control weed and the ability to endure drought led to the selection of *Neonotonia wightii*. In step 3 in Martinique, the assessment of the 24 species led to the selection of four grass species (*Urochloa mozambicensis* and 3 *Paspalum* spp.) and 3 legumes (2 *Macroptilium* spp. and *Centrosema pascuorum*). These cover crops were selected according to their agronomical performances: low biomass production combined with a high covering rate, leading to low competition with citrus and good weed control (figure 4.1.4).

4.2.3.4 Selected cover crops

The multicriteria grid led to the selection of two main families: *Fabaceae* (legumes) and *Poaceae* (grasses). Both families can control weeds with limited herbicide application. *Fabaceae* have a quick germination of seeds, are attractive for auxiliaries, and can potentially fix N if N is low in soil and if adequate rhizobium is present. However, they are very sensitive to trampling. *Poaceae* provide a deep and robust root system which aids in run-off control, good weed control, carrying capacity for vehicles, the potential to uptake minerals from the deep soil, and aids in soil structure improvement. However, the competition with the main crop for water and mineral fertilizers is high and they are not attractive for auxiliaries or pollinators. The main differences between the two selection sites were due to the experts' appreciation and local constraints that could explain the different issues.

¹ Ces 53 espèces sont détaillées en annexe 1.

Figure 4.2.5 : Phase d'installation de *Neonotonia wightii* durant la période d'expérimentation (septembre 2006 à août 2007). Il a fallu 15 semaines en saison humide pour former une couverture homogène. La plante a relativement bien toléré la sécheresse (mars à juin 2007), tout en montrant de temps en temps de légers signes de sécheresse.



4.2.4 Perspectives: Prototyping and cropping system design (figure 4.2.1)

The final aim of cover crop selection was their introduction in adoptable and eco-efficient cropping systems. In Guadeloupe, the selected cover crop, *N. wightii* (figure 4.1.5), has been introduced in mandarin and orange orchards in a participative process (Le Bellec *et al.*, 2009). The cropping system prototype, which consists of cover crop associated with citrus trees, is compared to natural cover cropping management with regular and moderate herbicide applications (Glyphosate). *N. wightii* suppressed efficiently weeds after 4 months but the establishment period has been facilitated with a selective herbicide (Fluazifop p butyl) 2 months after planting. Pesticide use has been reduced but not eliminated and sustainability assessment is in progress. The main service, weed control, has been sought as well as auxiliary hosting, in particular Phytoseideae, that controls citrus pests (*Phyllocoptruta oleivora*, and *Polyphagotarsonemus latus*) (Mailloux *et al.*, 2010), but the integration of all the others secondary services was not successful. For example, N fixing was not observed in our conditions. In Martinique, prototyping is in progress with *Paspalum notatum* cv. Common, but this herbaceous stratum is being colonized by more aggressive grasses like *Brachiaria humidicola* arriving from neighbouring fields or from seeds already present in the soil. Colonization is also observed by aggressive climbing dicotyledons (*Mikania micrantha*, Asteraceae, or *Momordica charantia*, Cucurbitaceae). Therefore, herbicide has been applied to the tree line and hand removing of the most aggressive weeds has been found to be necessary.

The implementation of a ground cover must be considered as an investment in the long term, and must be managed as carefully as the trees: stale seedbed technique, no-tillage technique, hand spot application of herbicide, and hand removal of some weeds must be used to achieve a good covering system. Next, prototypes will be developed using a multi-specific composition of the herbaceous part of the cropping system, mixing legumes and grasses.

4.2.5 Conclusion

Our multicriteria selection grid is a generic and adaptive tool for perennial and semi-perennial crops. It is currently also being used in banana cropping systems, resulting in different choices of cover crops. Introducing cover crops in orchards could be a good way of ecological engineering for weed control and thus reduced herbicide use. We adopted a systemic approach in the cover crop selection process, considering at the same time the main objective (weed control) and other agronomical and ecological services. Our results showed that the concept of an ideal cover plant has to be implemented in relation to the services potentially sought for the cover crop functional groups. When we applied our multi criteria assessment grid, the final number of cover crop species was very low and all the services we sought were not obtained. The most restrictive criteria in our grid were seed availability and regulation requirements. It is very important to take in account the fact that imported cover crops can potentially become invasive species. Thus, the consideration and use of local species (endemic or naturalized) should be preferable for further cover crop selection/cropping system design.

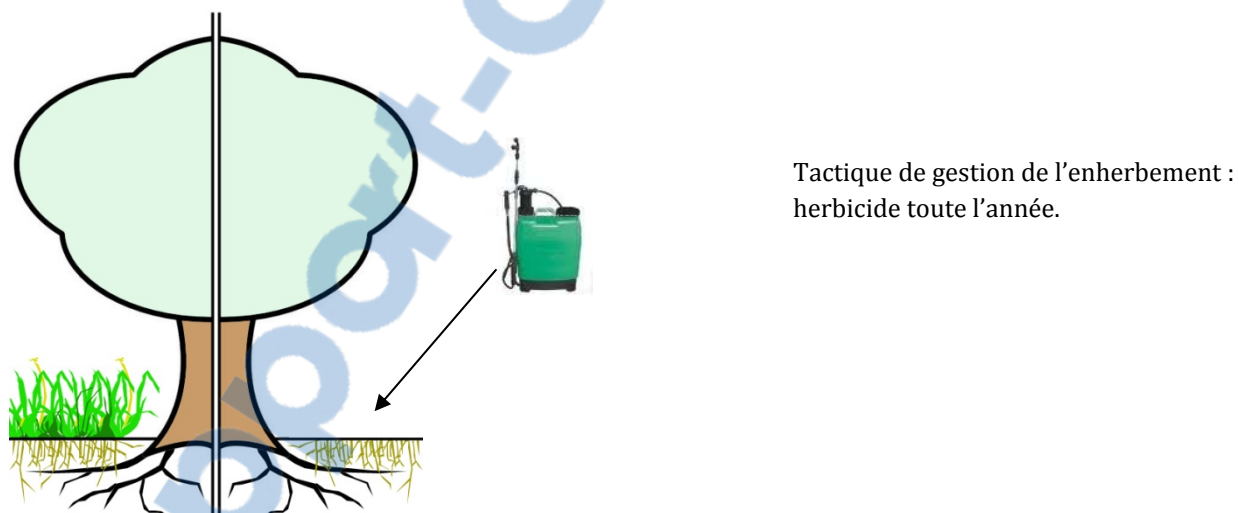
A single cover crop is not enough to cover all the functional traits we focused on, thus mixing of several families and species may prove to be a more efficient cover system in orchards: legumes for N fixing properties and auxiliary hosting and grasses for run-off control, soil structure improvement and field traffic. The efficiency of new cropping systems including multi-specific cover crops may be also improved with the design of specific spatial arrangements within families : legumes located under the citrus canopy and grasses in the inter row.

Future studies will use the same framework and multicriteria assessment grid to combine different controlled mixed covers using both native and non-native plants in order to address all agronomical and ecological services and promote global agro-ecological functioning and regulations in orchards while excluding herbicide use.

Figure 4.3.1 : Prototype PV (Perennial Vegetation)



Figure 4.3.2: Prototype GLY.



4.3 CO-CONSTRUCTION DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT

Trois réunions d'acteurs ont été nécessaires pour aboutir à la définition et co-conception des prototypes de gestion de l'enherbement. La première a eu lieu le 9 novembre 2006 (Le Bellec, 2006) devant 50 professionnels (agriculteurs, représentants d'institutions et de groupements professionnels), réunion durant laquelle les résultats du diagnostic ont été présentés (Le Bellec *et al.*, 2006). Un objectif principal d'amélioration du système de culture agrumicole guadeloupéen a émergé lors des discussions avec ces acteurs: gérer l'enherbement en diminuant les herbicides. Pour l'autre contrainte identifiée lors du diagnostic (manque de compétence pour la gestion des maladies et ravageurs), des dispositions ont été prises pour professionnaliser les producteurs et leurs salariés via des formations continues¹. La seconde réunion a eu lieu le 08 novembre 2007 (Le Bellec, 2007) devant également 50 professionnels de même nature et devant lesquels les résultats et conclusions de la section précédente (chapitre 4.1) ont été restitués (Damas *et al.*, 2007). Une discussion sur les moyens et méthodes de gestion de l'enherbement s'en est suivie pour aboutir à un cadre de contraintes déterminant les objectifs généraux d'amélioration du système de culture (figure 3.8). A notre invitation, trois participants représentant chacun un 'type de producteurs' identifié lors du diagnostic (voir chapitre 3.2.1) se sont proposés pour poursuivre, au sein d'un groupe de travail plus restreint (nommé groupe 'professional stakeholders'), le processus de reconception du système de culture sur la base de ce cadre de contraintes et de leur savoir technique. Ce groupe composé de ces trois producteurs, du technicien de la structure professionnelle d'accompagnement des producteurs de fruits de Guadeloupe (ASSOFWI) ainsi que deux chercheurs du CIRAD s'est réuni le 2 juin 2008 pour définir ensemble des tactiques de gestion de l'enherbement à tester en station expérimentale (étape 3 de la méthode DISCS, figure 2.1). Cinq prototypes de gestion de l'enherbement ont été construits sur la base des conclusions de cette réunion, deux de ces prototypes sont les témoins des deux principales pratiques actuellement observées en Guadeloupe (PV et GLY)², les autres constituent des prototypes innovants (AV, ANeo et PNeo). *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) J.A. Lackey (Fabacées), plante de couverture préalablement sélectionnée (chapitre 4.1), a été introduite dans les prototypes ANeo et PNeo. Les figures 4.3.1 à 4.3.5 illustrent ces différentes tactiques de gestion de l'enherbement.

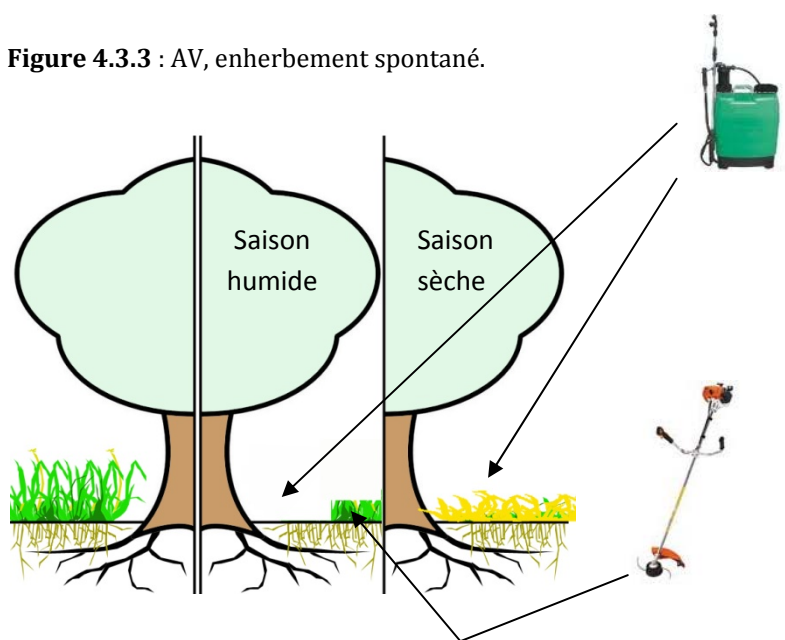
➤ **PV : Enherbement pérenne³ naturel (figure 4.3.1)** : gestion de l'enherbement par une mécanisation régulière du couvert (enherbement composé par la flore spontanée), détournage chimique autour des arbres dans un rayon d'un mètre (glyphosate, Glyphos® ; 360g/l ; Cheminova Agro A/S). Ce prototype représente la pratique préconisée par l'itinéraire technique de référence (De Roffignac, 2008).

¹ Durant la période 2006-2009, en collaboration avec l'organisme de formation WI Phyto Services et sur les fonds de formation VIVEA et FAFSEA, 95 producteurs et salariés agricoles ont suivi une ou plusieurs formations sur le thème général de la réduction des intrants.

² Pour des raisons d'homogénéité (articles/thèse), nous donnerons l'abréviation anglaise des prototypes : PV (Perennial spontaneous Vegetation), GLY (glyphosate), AV (Annual spontaneous Vegetation), ANeo (Annual ground cover with *N. wightii*) and PNeo (perennial ground cover with *N. wightii*).

³ L'appellation pérenne ou annuelle des prototypes n'est pas liée aux caractéristiques biologiques des plantes composant l'enherbement mais en relation avec leur persistance souhaitée dans le temps.

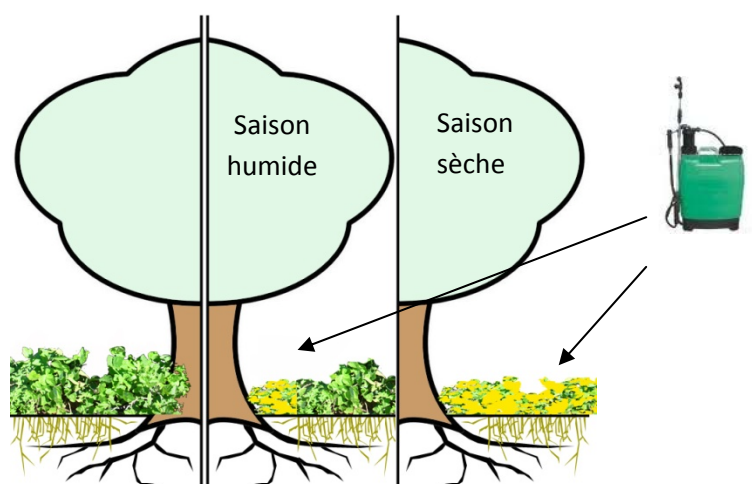
Figure 4.3.3 : AV, enherbement spontané.



Tactique de gestion de l'enherbement :

1/ débroussaillage et herbicide (pourtour de l'arbre) toute l'année et 2/ herbicide sur la totalité une fois par an.

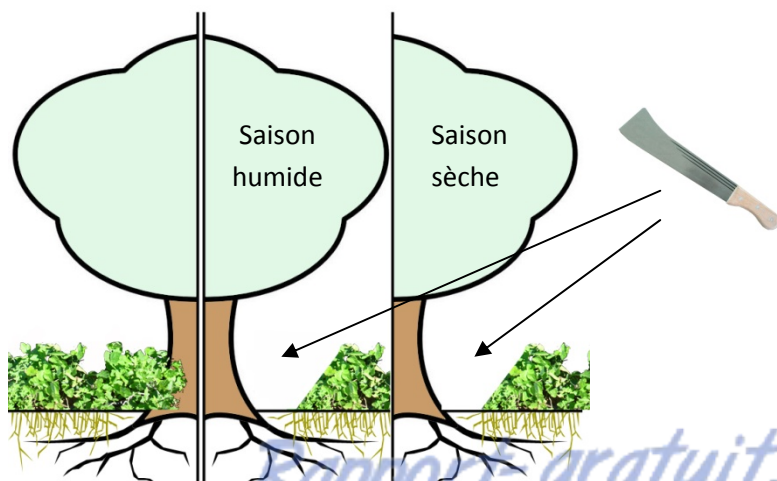
Figure 4.3.4 : ANeo, enherbement annuel à base d'une 'légumineuse' semée



Tactique de gestion de l'enherbement :

1/ herbicide (pourtour de l'arbre) toute l'année et 2/ herbicide sur la totalité une fois par an.

Figure 4.3.5 : PNeo, enherbement pérenne à base d'une 'légumineuse' semée



Tactique de gestion de l'enherbement :
manuelle toute l'année.



➤ **GLY : Désherbage chimique (figure 4.3.2)** : gestion de l'enherbement par des applications régulières d'herbicides (glyphosate, Glyphos® ; 360g/l ; Cheminova Agro A/S) sur l'ensemble de la parcelle. Ce prototype représente la pratique courante des agrumiculteurs (voir chapitre 3.).

➤ **AV : Enherbement annuel naturel (figure 4.3.3)** : gestion de l'enherbement par une mécanisation régulière du couvert (enherbement composé par la flore spontanée), détournage chimique autour des arbres dans un rayon d'un mètre (glyphosate, Glyphos® ; 360g/l ; Cheminova Agro A/S). A l'entrée de la saison sèche, lorsque la concurrence (enherbement/agrumes) pour l'eau est avérée, l'enherbement est détruit en totalité par un herbicide (Glyphos) laissant un mulch mort sur l'ensemble de la parcelle.

➤ **ANeo : Enherbement annuel à base d'une 'légumineuse' semée (figure 4.3.4)** : gestion de l'enherbement basée sur l'implantation d'une plante de couverture (*N. wightii*) ne nécessitant pas d'intervention mécanique en cours de cycle (annuel), détournage chimique autour des arbres dans un rayon d'un mètre (glyphosate, Glyphos® ; 360g/l ; Cheminova Agro A/S). A l'entrée de la saison sèche, même tactique que pour AV. Ce prototype est adapté notamment aux systèmes de culture en pente (ou sur sol interdisant la mécanisation).

➤ **PNeo : Enherbement pérenne à base d'une 'légumineuse' semée (figure 4.3.5)** : gestion de l'enherbement basée sur l'implantation d'une plante de couverture (*N. wightii*) ne nécessitant pas d'intervention mécanique pour sa régulation, détournage manuel des arbres dans un rayon d'un mètre. Ce prototype est adapté aux systèmes de culture en pente ou sur sol interdisant la mécanisation mais peut également être entrepris dans tout type de milieu physique. Aucun herbicide chimique n'est appliqué sur ce prototype.

Une fois les objectifs d'amélioration du système de culture 'transcrits' en prototypes, nous avons ensuite mobilisé un nouveau groupe d'acteurs pour définir les critères de leur évaluation. Les objectifs de développement d'un système de culture durable, nous ont motivé à élargir ce groupe (nommé 'public stakeholders') aux représentants de cette filière. Ce groupe composé d'un producteur, d'un consommateur, d'un représentant du développement, d'un gestionnaire du parc naturel de Guadeloupe, d'un chercheur et d'un représentant des services de l'Etat s'est réuni à deux reprises le 30 juin 2008 et le 1 avril 2009 pour déterminer ensemble des critères d'évaluation du système de culture. Lors de la première réunion, le groupe a décidé de coopter deux autres acteurs pour améliorer leur représentativité (un représentant d'une structure de commercialisation et un professionnel de la santé). Suite à ces deux séances de travail, les critères d'évaluation du système de culture ont été décidés (voir tableau 2.1) ; nous les détaillerons également dans le chapitre 6. Ce sont sur ces exigences d'évaluation que le dispositif expérimental mis en œuvre dans le cadre de la 3^{ème} étape de la méthode DISCS a été construit.

Figure 4.4.1 : Dispositif expérimental, chaque parcellaire élémentaire d'une surface de 105 m² comporte 3 arbres sauf pour le prototype LMV qui n'en comporte aucun.

LMV	LMV	LMV	LMV	LMV
GLY	ANeo	PNeo	PV	AV
ANeo	PV	GLY	AV	PNeo
PNeo	AV	ANeo	PV	GLY
PV	ANeo	AV	GLY	PNeo
PNeo	AV	GLY	ANeo	PV

Figure 4.4.2 : dispositif expérimental (janvier 2009), les 30 parcelles élémentaires sont séparées par une haie artificielle d'un mètre de hauteur. Le prototype PV encadré correspond à la parcelle élémentaire PV également encadrée sur la figure 4.3.3.1.



4.4 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

4.4.1 Site d'étude

L'expérimentation a été menée sur le site expérimental du CIRAD de Vieux-Habitants en Guadeloupe¹ durant trois années (de janvier 2008 à décembre 2010). Ce site est situé en Côte-Sous-le-Vent à une altitude de 24 m. La végétation naturelle environnante est de type xérophile, caractéristique des forêts tropicales sèches. Elle est plus ou moins dégradée (Sastre & Breuil, 2007). Le sol est de type fluvisol caractérisé par un pH de 6.5 et une teneur en matière organique moyenne de 2.5 % et composé de 34 % d'argile, 23 % de limon et 43 % de sable. La parcelle est orientée ouest/sud-ouest. La pente est d'environ 10 % orienté vers un petit ruisseau permanent d'1 mètre de large. Une bande enherbée et régulièrement fauchée (enherbement spontané) de 10 m sépare la parcelle du ruisseau.

4.4.2 Implantation du verger expérimental

Le verger, constitué de 75 orangers cv 'Valencia late' greffés sur *Citrus volkameriana*², a été planté le 21 janvier 2008 avec des plants issus de notre pépinière, âgés d'un an et préformés sur 4 branches charpentières. Cette plantation a eu lieu 15 jours après l'application d'un herbicide (glyphosate 4 l/ha ; Glyphos® ; 360 g/l) sur la surface totale de la parcelle et selon les recommandations de l'itinéraire technique de référence (De Roffignac, 2008). La densité de plantation est de 5 m entre 2 arbres et 7 m entre 2 rangs. Les rangs, au nombre de 5, ont été implantés perpendiculairement à la pente. Les analyses de sol n'ayant révélées aucune carence minérale particulière, seul un apport de 10 kg d'engrais organique déshydraté (Orgaliz® ; 4-2.5-8 + 1MgO) par arbre a été réalisé en fumure de fond. Un système d'irrigation goutte-à-goutte au sol assure les apports d'eau, chaque arbre compte 5 goutteurs autorégulés (4 l/h) disposés sous sa frondaison.

4.4.3 Implantation du dispositif expérimental

En août 2008, le verger a été divisé en 25 parcelles élémentaires de 105 m² comprenant chacune 3 arbres soit 5 parcelles élémentaires par rang. Sur chaque rang un prototype de gestion de l'enherbement (PV, GLY, AV, ANeo et PNeo) a été attribué à chacune des parcelles élémentaires par tirage au sort (figure 4.4.1). Une série de 5 autres parcelles élémentaires constituant un 6^{ième} rang au nord de la parcelle a été créée pour servir de bande de référence de la végétation spontanée ne subissant qu'un seul fauchage annuel (nommé LMV pour 'Late Mowing Vegetation'). Le dispositif est donc constitué de 30 parcelles élémentaires (6 traitements (5 prototypes de gestion de l'enherbement + LMV) x 5 répétitions), toutes séparées physiquement par une haie artificielle (toile tissée de type brise vue) de 1 m de hauteur (figure 4.4.2).

¹ Guadeloupe (16°04'N, 61°44'W)

² Cette association porte-greffe/variété a été choisie après discussion avec les acteurs car elle représente l'association la plus courante en vergers d'agrumes en Guadeloupe.

Tableau 4.4.1 : Récapitulatif des différentes opérations de gestion de l'enherbement sur les prototypes. ITK (itinéraire technique de référence). L'herbicide total avant la plantation des arbres n'a pas été comptabilisé. L'appellation 'tactique pérenne ou annuelle' des prototypes n'est pas liée aux caractéristiques biologiques des plantes composant l'enherbement mais en relation avec leur persistance souhaitée dans le temps.

Prototypes	Tactiques de gestion de l'enherbement	Type de végétation	Total et type d'opérations de gestion de l'enherbement durant les 3 années d'expérimentation (de janvier 2008 à décembre 2010)			
			Herbicide		Fauçage sur la surface totale	Désherbage manuel autour des arbres
			Surface totale	Sous la frondaison des arbres		
PV	Pratique de l'ITK Mécanisation / 'Pérenne'	Spontanée	0	9	9	0
GLY	Pratique courante de producteurs 'Annuelle'	Spontanée	9	-	0	0
AV	'Annuelle'	Spontanée	2	9	9	0
ANeo	'Annuelle'	Introduction de <i>N. wightii</i>	2	9	0	0
PNeo	'Pérenne'	Introduction de <i>N. wightii</i>	0	0	0	9

Figure 4.4.3 : Capteur de déplacement enregistrant les variations du diamètre du tronc des arbres au cours de la journée.



4.4.4 Management des pratiques culturales

Le management des arbres a été basé sur un jeu de règles de décision déterminant le type et le niveau d'intervention pour chacune des opérations culturales. Les conclusions de ces règles ont reposé sur les recommandations de l'itinéraire technique de référence (De Roffignac, 2008), sur les caractéristiques des cinq prototypes et sur les niveaux de compétition mesurés sur les arbres. Lorsqu'une décision a été prise pour une parcelle élémentaire, les quatre autres répétitions ont subi la même décision.

➤ **Gestion de l'enherbement** : les tactiques propres à chacun des prototypes ont déterminé les règles de décision, le nombre et le type d'intervention sont résumés pour toute la durée de l'expérimentation dans le tableau 4.4.1. La règle de décision spécifique aux prototypes AV et ANeo visant à limiter les compétitions entre l'enherbement et les arbres durant la saison sèche (période d'observation de décembre à juin) a été appliquée lorsqu'une diminution/stagnation de croissance des troncs est enregistrée par des capteurs de déplacement 'Pépista' (figure 4.4.3) durant 9 relevés consécutifs (3 semaines). Lorsque la compétition est avérée, la suppression totale de l'enherbement a été réalisée par un herbicide sur la totalité de la surface (glyphosate 4 l/ha ; Glyphos® ; 360 g/l). Cette règle a dû être appliquée à ces deux prototypes en mars 2009 et février 2010.

➤ **Alimentation hydrique** : les apports d'eau ont été réalisés les lundis, mercredis et vendredis de janvier 2008 à décembre 2010 sur la base de 85 % de l'évapotranspiration (ETP) selon les recommandations de la FAO. La dose d'irrigation minimale pour tous les arbres des cinq prototypes a été de (0.85 x ETP)-Pluviométrie (somme des pluies relevée entre 2 relevés). L'ETP a été calculé selon la formule de Penman-Monteith et avec les données météorologiques enregistrées sur la parcelle d'expérimentation grâce à une centrale d'acquisition de type CR800® (Campbell Scientific, France). Des apports d'eau supplémentaires ont ensuite été réalisés en fonction des stress hydriques mesurés. L'indicateur retenu a été la mesure de la rétractation du tronc. Goldhammer *et al.* (1999) ont en effet démontré que des stress hydriques sur arbres pouvaient être reliés à la mesure du MNTD (minimum daily trunk diameter variation). Pour mesurer ce MNTD nous avons équipé 3 arbres par prototype de capteurs/enregistreur micrométrique de déplacement (figure 4.4.3) reliés à une centrale d'acquisition Pepista 808® (Agro-technologie, France). Les mesures ont été effectuées toutes les ½ heures d'août 2008 (date d'implantation des prototypes) à décembre 2010. Les apports d'eau supplémentaires ont été déterminés en s'inspirant des travaux de Goldhamer & Fereres (2001) et Ortuno *et al.* (2008) et selon la règle de décision suivante :

'Si valeur Ø tronc mesurée (MNTD) est inférieure de 20 % à Ø tronc de référence (GLY) alors dose d'irrigation supplémentaire de 10%'.

Constatant, en fin de première année de suivi, des différences de croissance inférieures et significatives entre les arbres de tous les prototypes par rapport à ceux de GLY, cette règle de décision a été revue à la hausse en mars 2009.

'Si valeur Ø tronc mesurée (MNTD) est inférieure de 20 % à Ø tronc de référence (GLY) alors dose d'irrigation supplémentaire de 20%'.

Les arbres du prototype GLY ont servi de référence car la destruction régulière de l'enherbement limite les risques de compétitions pour l'eau.

➤ Suivi épidémiologique : le suivi a été réalisé tous les mois de janvier 2008 à décembre 2010, sur l'ensemble des arbres. La décision et le type d'intervention vis-à-vis des parasites observés se sont conformés aux recommandations de l'itinéraire technique de référence et notamment à ses seuils de tolérance et aux produits phytopharmaceutiques prescrits (De Roffignac, 2008). Cependant, et compte tenu des risques encourus par les jeunes vergers, une lutte biologique via des nématodes entomopathogènes (*Heterorhabditis indica*) contre *Diaprepes* spp. a été entreprise sur l'ensemble des arbres du verger selon le protocole en vigueur (Le Bellec & Mauléon, 2010), soit l'inoculation d'*H. indica* au pied de chaque arbre 2 fois par an (au début de la saison humide et 3 mois après). *H. indica* est introduit dans le système grâce à un hôte alternatif issu de nos élevages (larves de *Galleria mellonella* infectées en laboratoire par *H. indica*).

➤ Alimentation minérale : les apports ont suivi les recommandations de l'itinéraire technique de référence (De Roffignac, 2008) soit une fertilisation minérale d'un engrais composé (14-4-10) au pied des arbres de 47 g /arbre tous les mois la première année, 95 g la seconde et 170 g la troisième. Des analyses physico-chimiques de sol et de feuilles en année 0, n+1 et n+2 et n+3 ont été réalisées pour ajuster le cas échéant cette fumure en fonction des carences mesurées et selon les recommandations de Marchal (1984) et Davies & Albrigo (1994). Les analyses de sol (pH, N, matière organique, Ca, Mg, K et Na ; 3 échantillons par parcelle élémentaire à 2 profondeurs de sol : 0-20 cm et 20-40 cm) ont été réalisées les 4/01/08 et les 15/12 de 2008, 2009 et 2010 et les analyses de feuilles (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu et B, prélèvements de 120 feuilles par parcelle élémentaires) les 10/11 de 2008, 2009 et 2010.

4.4.5 Suivis et observations des prototypes

Les chapitres 5 et 6 (section matériels et méthodes des trois articles les composant) reprennent dans le détail les observations réalisées sur les prototypes pour répondre aux deux derniers objectifs de cette thèse.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 5

INTÉRÊT DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT EN VERGER D'AGRUMES DANS L'OPTIQUE D'UNE LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION DES HABITATS

Ce chapitre correspond à deux articles. Le premier (chapitre 5.1), soumis à *Weed Research*, est intitulé 'Predicting the nectar provisioning capacity of weeds to beneficial arthropods using an integrative indicator: an application to tropical orchards'. Son objectif est, à l'aide d'un indicateur, d'évaluer l'intérêt des prototypes de gestion de l'enherbement dans la fourniture de nourriture alternative recherchée par la faune auxiliaire. Le second article (chapitre 5.2), publié dans la revue *Experimental Applied Acarology*, est intitulé 'Influence of ground cover management on diversity and density of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in Guadeloupean citrus orchards'. Son objectif est d'évaluer l'intérêt des prototypes de gestion de l'enherbement dans l'hébergement d'une famille d'auxiliaires des cultures, les phytoseiidae – prédateurs des acariens phytophages des agrumes.

Ces expérimentations contribuent à évaluer l'intérêt de nos prototypes de gestion de l'enherbement en tant qu'habitat pour la lutte biologique par conservation. Nous faisons l'hypothèse qu'en créant des zones d'hébergement favorables aux auxiliaires des cultures (Quilici *et al.*, 2003) nous contribuerons à l'équilibre biologique du verger afin de lutter durablement contre les parasites (Khan *et al.*, 2008). Nous souhaitons également mobiliser directement ou indirectement les résultats obtenus pour la construction des indicateurs d'évaluation nécessaires à l'analyse multicritère des prototypes (chapitre 6).

5.1 Predicting the nectar provisioning capacity of weeds to beneficial arthropods using an integrative indicator: an application to tropical orchards

Le Bellec F.^{1*}, Dubois P.¹, Sarthou J.P.^{2,3}, Malézieux E.¹

¹ CIRAD, UPR Hortsys, Boulevard de la Lironde, PS IV, F-34398 Montpellier cedex 5, France

² Université de Toulouse, ENSAT, UMR 1201 DYNAFOR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

³ INRA, UMR 1201 DYNAFOR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

* Corresponding author

Weed Research, submitted

Summary

In agroecosystems, the management of non-cultivated vegetation to ensure food supply to beneficial arthropods is a key challenge for increasing biological control and hence reducing the need for chemical pesticides. Spontaneous vegetation can fulfil this function, particularly in supplying many carnivorous predators and almost all parasitoids with nectar. Among the potential indicators of nectar provisioning, those based on functional floral traits were selected because they can be generalized to other habitats and are easy to assess in the field. Three easily observable floral traits were used along with two other input variables (species richness and ground cover rate) to build an integrative indicator, Nectar Provisioning Indicator (NPI), based on a fuzzy expert system. This indicator was applied in a tropical citrus orchard with six weed management treatments designed to limit the use of herbicides in the agrosystem. The treatments differed in ground cover vegetation, frequency of mowing, and herbicide use. An indirect evaluation of nectar provisioning in weed management treatments was based on lacewing (Neuroptera: Chrysopidae). Our results show that the number of agricultural weed practices influences weed vegetation dynamics and that the lacewing egg deposition is linked to weeding practices. NPI allowed to rank the treatments with respect to their potential for nectar provisioning capacity. NPI is flexible and it can be used as a decision aid tool to choose between alternative weed management options based on their potential impact on the conservation of beneficial insects.

Keywords: Biotic indicator, nectar supply, lacewing, conservation biological control, weed management, citrus

5.1.1 Introduction

Natural biological control of pests in agroecosystems is currently receiving more and more attention due to the increasing emergence of chemical-resistant pests, regulations governing the use of chemicals, and a strong social demand for sustainable agricultural products (Isaacs *et al.*, 2009). An effective way to increase natural pest regulation consists in allowing spontaneous vegetation to grow and bloom in the field (in the crop itself, or as an inter-row) or in the vicinity (field margin, non-cultivated plant strips, ditches, etc.) (Landis *et al.*, 2000; Olson and Wäckers, 2007; Bianchi and Wäckers, 2008; Isaacs *et al.*, 2009). Indeed, most carnivorous predators and almost all parasitoids require plant-provided food such as nectar (either in flowers or on extra-floral nectaries), pollen, honeydew, sap or cell liquids for optimal survival, fitness and fecundity (Wäckers, 2004; Wäckers *et al.*, 2005; Hanley *et al.*, 2007). However, the impact of weed management on plant-provided food for predators and parasitoids remains poorly documented (Bàrberi *et al.*, 2010). As a result, and given that nectar remains the main energetic food for flower-visiting beneficial insects, there is a need for a tool to assess the nectar-provisioning capacity of vegetation in cropping systems with the aim of optimizing habitat management.

Classical bioindication methods rely on taxonomy and are often linked to specific environments, thus limiting their wider application. According to Feld *et al.* (2009) and de Bello *et al.* (2010), a functional approach is better as it can be used regardless of the environment and species under study. Functional floral traits are important features of plants that influence biological control by providing food to natural enemies as beneficial food complements or as substitutes in the case of prey/host scarcity (Wäckers, 2004; Wäckers *et al.*, 2005). Hence, such functional floral traits can be used for inter-habitat comparison of potential ecological service delivery (de Bello *et al.*, 2010). As stated by Bàrberi *et al.* (2010) *'as such, there is potential to conduct innovative interdisciplinary research on functional biodiversity-related subjects and hence increase knowledge on the drivers of weed/arthropod interactions in agroecosystems across different spatial and temporal scales'*. Like the pollination syndromes used to predict the attractiveness of flowers for pollinators (Faegri and Pijl, 1979), we propose the use of simple functional floral traits that are visible to the naked eye to predict the capacity of flowers to supply nectar to natural enemies of pests.

The aim of this paper is to propose an integrative indicator based on floral traits for assessing the nectar-provisioning capacity of ground cover vegetation for beneficial nectarivores. We used the indicator in a tropical citrus orchard in the French West Indies with different weed management treatments. Weed control is one of the main constraints faced by producers in tropical humid environments. As weeds are hard to control in integrated production systems, this usually requires large quantities of herbicides (Le Bellec *et al.*, 2011). How can weeds be managed in orchards with minimal herbicide use? Maintaining weeds as a free ground cover, i.e. as spontaneous vegetation, results in high orchard management constraints and high competition with the crop (such as water competition). However, maintaining weeds can also provide, in some cases, a free service for the enhancement of biological control (Cortesero *et al.*, 2000, Grundy *et al.*, 2010, Mailloux *et al.*, 2010). What, therefore, is the best weeding strategy? This paper seeks to address this question with the creation of an indicator for predicted nectar provisioning capacity that can be used by non-scientists to make optimal weed management decisions.

5.1.2 Material and methods

The method consisted in i) characterizing the ground cover vegetation in a variety of situations, ii) assessing floral characteristics of each plant species identified and iii) aggregating the variables to build an integrative indicator. The method was tested in a field trial including six weed management treatments in a citrus orchard in Guadeloupe representing current and innovative weeding practices (Le Bellec *et al.*, 2011). Chrysopidae family was chosen to assess the indirect nectar provisioning for the indicator validation.

5.1.2.1 Characterization of ground cover vegetation

We calculated three quantitative variables of ground cover vegetation: species richness (SR), ground cover rate (GC) and proportion of ground cover per plant species.

Qualitative characterization of ground cover included two steps. First, the floral traits of each species were assessed and then a Floral Score (FS) based on interest of these traits was calculated. Three floral traits were considered: (i) flower morphology, (ii) corolla colour and (iii) corolla size. All these floral traits have been shown to influence nectar provision to biological control agents in previous studies (Hingston and Mc Quillan, 2000; Machado and Lopes, 2004; Wäckers *et al.*, 2005; Chittka and Raine, 2006; Makrodimos *et al.*, 2008; Winkler *et al.*, 2009), and are easily observable with the naked eye. Other floral traits such as flower odour (Chittka and Raine, 2006) and nectar suitability (vitamin content, sugar ratio, amino acid, digestibility (Wäckers *et al.*, 2005, Hanley *et al.*, 2007)) were not selected due to the difficulty of observation.

A 'Free access' type flower species, characterized by largely open and capitate flower, was considered as it allows any flower visitor to feed on nectar regardless of its degree of specialization (Makrodimos *et al.*, 2008), compared to flag-shape flowers and small tubes which are more selective. Success in accessing nectar depends on body size, strength, intra-guild facilitation (e.g. prior passing of a large visitor strong enough to force open the wings of flag-shape flowers) (Hingston and Mc Quillan, 2000; Machado and Lopes, 2004). Nectar at the bottom of long tubes (more than 2 mm in length) is only accessible to specialist nectarivores equipped with elongated mouth parts (Machado and Lopes, 2004, Makrodimos *et al.*, 2008) and therefore remains out of reach of nectar-feeding predators.

Both corolla colour and corolla size characterize flower attractiveness for nectar-feeding insects. Corolla colour is one of the most important cues for insect recognition of flowers (Begum *et al.*, 2004). As emphasized by Makrodimos *et al.* (2008), pale colours (predominantly white, yellow and pale pink) are more attractive for generalist insects. Bright colours (blue, red, purple, etc.) are more attractive for specialist pollinators with adapted elongated mouth parts. With respect to flower corolla size, Chittka and Raine (2006) highlighted the fact that the search time spent by flower visitors decreases considerably with increasing flower size. Flower size was qualified according to Fournet (2002) and Machado and Lopes (2004) as 'large' when the diameter equal to or greater than 15 mm.

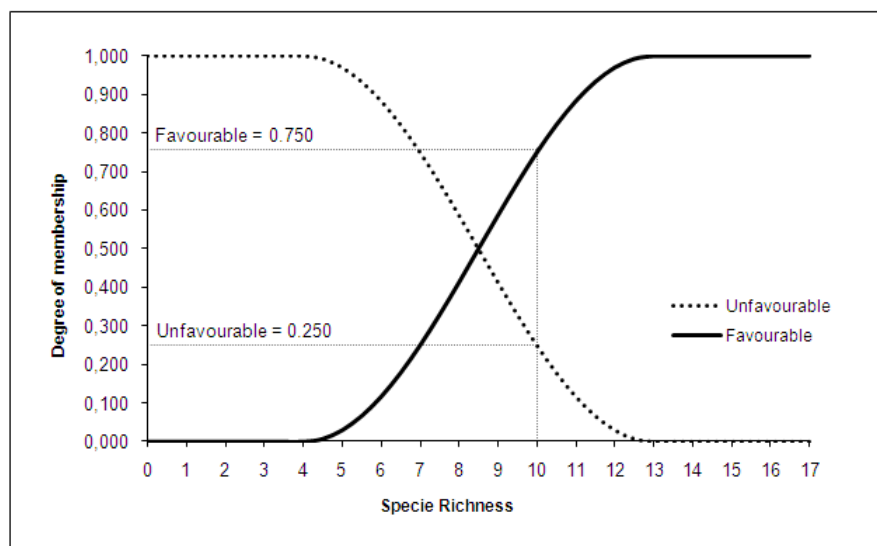
Therefore, the three floral traits selected for the characterization of the flowers were: 'open access', 'pale' flower and 'large' flower.

Table 5.1.1: Thresholds allocated to percentage 'Species Richness', 'Ground Cover' and 'Floral score' governing the membership of favourable and unfavourable subsets of nectar provision for nectarivorous biological control agents.

Conditions	Input variables of Nectar Provisioning Indicator (NPI)		
	Species richness	Ground Cover (%)	Floral score
Favourable subset (F)	≥ 13 species*	≥ 90	= to 100
Unfavourable subset (U)	≤ 4 species	≤ 65	= to 0
Fuzzy logic	from 5 to 12	from 66 to 89	from 1 to 99

*From Vitousek and Hooper (1993)

Figure 5.1.1: A sample calculation of degrees of membership (favourable and unfavourable) for an input variable (Specie Richness) in the fuzzy class (4 to 13 species). For ten species, the degree of membership for favourable subset is 0.750; membership to favourable subset = $(0.5 (\sin (\pi \times (((v-a)/(b-a))-0.5)))) + 0.5$. The degree of membership for unfavourable subset is 0.250; membership to unfavourable subset = $(0.5 (\cos (\pi \times ((v-a) / (b-a)))) + 0.5$. Where 'v' was the observed value (10 species) of the input variable, 'a' and 'b' were threshold values, 'a' (4species) as a minimum value (total membership to unfavourable subset) and 'b' (13 species) as a maximum value (total membership to favourable subset).



A Floral Score (FS) was calculated, to be applied to each species found in the ground cover vegetation. In absence of specific knowledge on the relative importance of the three specific floral traits, each floral trait received the same coefficient of interest for nectar provisioning:

$$FS = \sum_{(1 \leq j \leq 3)} [\sum_{(1 \leq i \leq n)} (\text{ground cover per plant species})] / 3$$

with FS: Floral Score, j: jth floral trait, i: ith plant species and n: maximum species richness

FS was expressed in percentage of the trait's presence in ground cover.

5.1.2.2 Nectar Provisioning Indicator (NPI) construction

To perform a multicriteria assessment of nectar provisioning capacity, the Nectar Provisioning Indicator (NPI) was built, based on a fuzzy expert system used for agri-environmental indicators (Van der Werf and Zimmer, 1998). This system can be used to aggregate different types of variables using expert scientific knowledge. The aggregation procedure can be summarized in four steps (Tixier *et al.*, 2007):

(1) Identification of representative variables. In our case, three variables are aggregated: 'Floral Score' (FS) predicted the ability of ground cover vegetation (nectar resource) to attract beneficial insects, 'Ground Cover' (GC) assessed the quantity of this resource and 'Species Richness' (SR) counted the diversity of this resource.

(2) Definition of their favourable (F), unfavourable (U) and fuzzy range. We based membership on data available in the literature or, in case of absence of specific knowledge, impartially (minimum to maximum values possible). The fuzzy class ranges for FS, GC and SR are given in Table 5.1.1. Sigmoid lines were used to calculate the degree of membership of the input variables (FS, GC and SR) in the fuzzy subsets F and U:

$$\text{Membership to F subset} = (0.5 (\sin (\pi \times ((v-a)/(b-a))-0.5))) + 0.5$$

$$\text{Membership to U subset} = (0.5 (\cos (\pi \times ((v-a) / (b-a)))) + 0.5$$

where 'v' was the observed value of the input variable, 'a' and 'b' were threshold values, 'a' as a minimum value (total membership to U subset) and 'b' as a maximum value (total membership to F subset). See a sample calculation of degree of membership in the figure 5.1.1.

(3) Definition of the weight of each variable in the expert system. In absence of specific knowledge on the relative importance of the specific variables, SR, GC and FS were all aggregated into NPI without hierarchy. When two variables out of three were favourable, NPI varied from 5 to 10. When two variables out of three were unfavourable, NPI varied from 0 to 3.

Table 5.1.2: Decision rules governing the allocation of Nectar Provisioning Indicator's ranging between 0 and 10. F: Favourable conditions; U: Unfavourable conditions

Condition of Nectar Provisioning Indicator (NPI)			Conclusion of decision rules
'Species Richness'	'Ground Cover'	'Floral Score'	
F	F	F	10
F	F	U	5
F	U	F	5
F	U	U	3
U	F	F	5
U	F	U	3
U	U	F	3
U	U	U	0

Table 5.1.3: A sample calculation of Sugeno's inference method with Specie Richness (SR): 10; Ground Cover (GC): 80 and Floral Score (FS): 50. The minimum of each decision rules (bold character) is multiply by conclusion of decision rules (italic characters). The sum of all possible combinations is then divided by the sum of all minimum and gives the Nectar Provisioning Indicator (NPI) score.

Condition of Nectar Provisioning Indicator			Conclusion of decision rules:
'Species Richness'	'Ground Cover'	'Floral Score'	
F (0.500)	F (0.905)	F (0.875)	<i>10</i>
F (0.500)	F (0.905)	U (0.125)	<i>5</i>
F (0.500)	U (0.095)	F (0.875)	<i>5</i>
F (0.500)	U (0.095)	U (0.125)	<i>3</i>
U (0.500)	F (0.905)	F (0.875)	<i>5</i>
U (0.500)	F (0.905)	U (0.125)	<i>3</i>
U (0.500)	U (0.095)	F (0.875)	<i>3</i>
U (0.500)	U (0.095)	U (0.125)	<i>0</i>

$$(10*0.500)+(5*0.125)+(5*0.095)+(3*0.095)+(5*0.500)+(3*0.125)+(3*0.095)+(0*0.095)$$

NPI =

$$0.500+0.125+0.095+0.095+0.500+0.125+0.095+0.095$$

NPI = 5.85

(4) Final calculation of the indicator with the expert system. Sugeno's inference method (Sugeno, 1985) was used to compute the final aggregation of NPI. Sugeno's inference method uses decision rules as shown in table 2 and the formula:

$$\text{NPI} = \frac{\sum \text{conclusion of the rule} \times \min (\text{membership degree of each decision rule's premise})}{\sum \min (\text{membership degree of each decision rule's premise})}$$

See a sample calculation of NPI in the table 5.1.3.

5.1.2.3 Sensitivity test of indicator

A sensitivity analysis was carried out to test the performance of NPI with different variations of the input variables. In order to test the impact of each input variable on NPI, we successively varied FS and GC by 10% and SR by 1 point. Each time a variable varied, we successively set both untested variables on unfavourable, mean and favourable conditions.

5.1.2.4 Field site and experimental treatments

The trial took place in Guadeloupe (16°N, 61°W) on a 3150 m² orchard plot planted on 21 January 2008 with 1-year-old plants of *Citrus sinensis* L. cv. 'Late Valencia' grafted onto *Citrus volkameriana* L. (plantation density of 5 x 7 m) after one herbicide treatment (glyphosate 4 L ha⁻¹; Glyphos®; 360 g L⁻¹; Cheminova Agro A/S) on the whole surface area. The plot is located at the CIRAD 'Le Bouchu' station, Vieux-Habitants, on the west coast of the island, on a lee shore at an altitude of 24 m. Soils are fluvisol (FAO classification; 2.5% organic carbon (OC); particle size distribution: 34% clay, 23% silt, 43% sand). Soil pH was 6.5. The climate is tropical with average annual rainfall of 1208 mm and an average temperature of 26.4°C in 2008/2009. The climate is characterized by a dry season from January to June. In 2008 and 2009, the average monthly rainfall in the dry period was 60 mm, versus 140 mm in the wet season from July to December. The field trial plot is surrounded by more or less degraded tropical dry forest (xerophilous vegetation).

A randomized block experimental design was set up with six different weed management treatments and five replicates (Table 4). The thirty experimental plots (105 m² each with three trees), were separated by a 1-m-high shade net. The six weed management treatments were as follows: (1) GLY (control): spontaneous vegetation was regularly sprayed with glyphosate (3 times a year); GLY is the current weeding practice in Guadeloupe; (2) AV: annual vegetation; spontaneous vegetation was mowed three times a year; chemical weed control (glyphosate) was applied around the trees three times a year and the whole surface area was sprayed once a year before the dry season to limit competition for water between weeds and citrus trees; (3) ANeo: 'annual' *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae); a leguminous cover crop sown every year; chemical weed control (glyphosate) was applied around the trees three times a year and the whole surface area was sprayed every year before the dry season to limit water stress of citrus trees; (4) PV: perennial vegetation; spontaneous vegetation was mowed three times a year and chemical weed control (glyphosate) applied around the trees three times a year;

Table 5.1.4: Number of agricultural practices undertaken in the six weed management treatments performed in the citrus orchard trial: GLY: 'herbicide tactic' with spontaneous vegetation, AV: 'annual tactic' with spontaneous vegetation, ANeo: 'annual tactic' with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PV: 'perennial tactic' with spontaneous vegetation, PNeo: 'perennial tactic' with *N. wightii* and LMV: late mowed spontaneous vegetation.

Weed management treatments	Number of weed agricultural practices (from January 2008 to January 2010)			
	Herbicide		Mowing (of the whole surface area)	Hand weeding (around citrus tree)
	Of the whole surface area	Around citrus tree		
GLY	6	0	0	0
AV	2	6	6	0
ANeo	2	6	0	0
PV	0	6	6	0
PNeo	0	0	0	6
LMV	0	0	2	0

(5) PNeo: 'perennial' *N. wightii*; managed like perennial vegetation (PV) and only cleared around citrus trees three times a year; with no herbicide treatment. (6) LMV (non-cultivated plant strip control): late mowed vegetation without trees; spontaneous vegetation was mowed only once a year to prevent the establishment of shrubby vegetation. Note that when applied to ground cover, the terms 'annual' and 'perennial' do not refer to the biology of the plants but to the persistence of the ground cover. AV, ANeo, PV, PNeo and LMV were designed to reduce the use of herbicides. A leguminous cover crop (*N. wightii*) was chosen as ground cover for ANeo and PNeo because previous results showed that it was highly competitive with weeds. PV is currently practiced by citrus growers where mechanization is possible. Five quantitative and qualitative characterization of ground cover were made from January 2008 to January 2010, the day before weeding operation. Observations allowed the study of vegetation status and blooming characteristics of all plant species throughout both dry and humid seasons. Ground cover rates were estimated visually and are the surface equivalent of the vertical projection of the aboveground parts of the plants onto the surface of the ground, expressed as a percentage. Plant species were identified on each plot using Fournet's botanical handbook (2002).

5.1.2.5 Evaluation of nectar provisioning

We performed an indirect evaluation of nectar provisioning in weed management treatments based on a beneficial insect bio-indicator. Lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) were chosen because while larvae are polyphagous predators feeding on several pests of economic importance, most of chrysopid adults feed on plant-derived food, such as nectar, pollen or even insect honeydew (Gibson & Hunter, 2005; Pappas *et al.*, 2011). Furthermore, lacewings are pertinent bio-indicators of a habitat's disturbance (Deutsch *et al.*, 2005). Nineteen observations were made on the central trees of weed management treatments from March 2008 to December 2009. In each plot, walking around the tree, 50 leaves were randomly chosen and observed on both faces. Adults fly off as soon as leaves are touched and tend to larvae hide, therefore only eggs were counted. Eggs perched on top of peduncles are typical of Chrysopidae. Food sources on the trees for lacewings were also checked. For aphids, we observed all the young branches and noted their presence on a quantitative scale (0, 10, 50, 100 and more). For mealybugs, we observed four branches (taken at random in directions N, S, W and E) and noted their presence with the same quantitative scale.

5.1.2.6 Statistical analyses

Statistical tests were performed with the software R[®] (using version 2.8.1). For the characterization of weed management treatments, we performed a multiple correspondence factorial analysis (using the 'Ade4' specific factorial analyses library). For all results, as variables did not have a normal distribution, a non-parametric ANOVA (Kruskal–Wallis test) and a mean comparison test (Mann–Whitney U test) were used to evaluate differences between the weed management treatments. First, the 25 samples (5 repetitions x 5 observations) were pooled to analyze the overall effect of the treatments, and then the same comparison tests were done date by date. Relationships between the lacewing eggs distribution in weed management treatments were sought for using χ^2 tests ($p < 0.5$). All factors that may affect the eggs distribution were tested (predators' distribution, weeds, floral traits, FS, GC, SR and NPI score) on the five common dates (lacewings/weed management treatments observations) from March 2008 to December 2009.

Table 5.1.5: The fifteen major plant species and their floral traits observed in the ground cover vegetation of the six weed management treatments performed in the citrus orchard trial. GLY: ‘herbicide tactic’ with spontaneous vegetation, AV: ‘annual tactic’ with spontaneous vegetation, ANeo: ‘annual tactic’ with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PV: ‘perennial tactic’ with spontaneous vegetation, PNeo: ‘perennial tactic’ with *N. wightii* and LMV: late mowed spontaneous vegetation. Floral traits: ‘Free access’ (flower morphology), ‘Large’ (corolla size) and ‘Pale’ (corolla colour).

Weed species	Weed management treatments						Floral traits		
	GLY	AV	ANeo	PV	PNeo	LMV	‘Free access’	‘Large’	‘Pale’
<i>Achyranthes aspera</i>	-	-	5	-	-	-	no	no	yes
<i>Centrosoma pubescens</i>	-	-	-	-	-	8	no	no	yes
<i>Chamaesyce hirta</i>	-	6	-	-	-	-	yes	no	yes
<i>Cleome ruidosperma</i>	6	-	-	-	-	-	yes	no	yes
<i>Dicanthium annulatum</i>	-	-	-	12	-	6	no	no	yes
<i>Echinochloa colona</i>	21	11	-	6	-	-	no	no	yes
<i>Eleusine indica</i>	10	-	-	-	-	-	no	no	yes
<i>Leptochloa filiformis</i>	7	6	-	7	-	14	no	no	yes
<i>Leucaena leucocephala</i>	-	-	-	-	-	5	yes	yes	yes
<i>Mimosa tortuosa</i>	-	-	-	-	-	6	yes	no	yes
<i>Neonotonia wightii</i>	-	-	79	-	86	-	no	no	yes
<i>Panicum maximum</i>	-	-	-	-	-	21	no	no	yes
<i>Paspalum conjugatum</i>	-	-	-	-	-	10	no	no	yes
<i>Tridax procumbens</i>	8	25	-	19	-	-	no	no	yes
<i>Vernonia cinerea</i>	-	18	-	16	-	-	yes	no	no
Total of ground cover composition	52	66	84	60	86	70			
Other weeds of ground cover (%)	48	34	16	40	14	30			

Table 5.1.6: Contribution of the floral traits for beneficial arthropods to the composition of ground cover vegetation in the six weed management treatments performed in the citrus orchard trial: GLY: ‘herbicide tactic’ with spontaneous vegetation, AV: ‘annual tactic’ with spontaneous vegetation, ANeo: ‘annual tactic’ with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PV: ‘perennial tactic’ with spontaneous vegetation, PNeo: ‘perennial tactic’ with *N. wightii* and LMV: late mowed spontaneous vegetation. NPI: Nectar provisioning indicator.

Treatments	Floral traits			‘Floral Score’	‘Ground	Specie	NPI
	Morphology	Colour	Size				
GLY	43.2 a ±26	92.4 ab ±4	1.8 bc ±1.8	45.8 a ±8.5	60 c ±18	12 bc ±3	4.3 b ±1.9
AV	42.8 ab ±15	69.6 c ±15	1.2 bc ±1.8	37.9 bc ±3	84 bc ±8	13 a ±3	5.2 a ±1.4
Aneo	8.6 c ±8	95.4 ab ±6.7	0.8 c ±1.1	34.9 c ±1.5	97 a ±2	10 c ±4	5.1 a ±1.3
PV	31.4 ab ±4.3	77.6 b ±15	5.8 b ±4.3	38.3 b ±3.4	85 bc ±6	14 a ±2	5.4 a ±0.9
PNeo	5.6 c ±6.23	95.4 a ±4	0.2 c ±0.4	33.7 c ±1	100 a ±0	5 c ±1	4.1 b ±0.5
LMV	18.4 bc ±13	94.6 ab ±4.3	19.8 a ±5.6	44.3 ab ±4	89 b ±5	12 bc ±3	5.9 a ±1.2

Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$; Wilcoxon rank sum test)

5.1.3 Results

5.1.3.1 Influence of weed management treatments on ground cover and NPI input variables

A total of seventy-three plant species were observed in the weed management treatments. However, fifteen major species made up the majority of the ground cover (mean ground cover rate > 5%) (table 5.1.5). Plant communities showed significant differences in SR and GC depending on the treatment (table 5.1.6).

The highest ground cover rate was observed in PNeo and ANeo and the greatest specific richness in PV and AV. Treatments PNeo (5 ± 1 SR; $100 \pm 0\%$ GC) and GLY (12 ± 3 SR; $60 \pm 18\%$ GC) did not allow both high SR and high GC. Treatments ANeo, AV, PV and LMV resulted in a better compromise between SR and GC. Weed management treatments influenced the composition of ground cover. Multiple correspondence factorial analysis showed a polarization in two groups of treatments characterized by presence/absence of monocotyledonous species in plant communities (figure 5.1.2). Axes 1 and 2 explained 80 % of this distribution. Group 1 subdivided into two subgroups: group 1.1 composed by monocotyledonous species and perennial dicotyledonous species (LMV treatment); group 1.2 composed by monocotyledonous species and annual dicotyledonous species (PV, AV and GLY treatments). Group 2, characterized by the absence of monocotyledonous species (ANeo and PNeo treatments) and composed exclusively by *Neonotonia wightii*. *N. wightii*, was highly competitive against other weeds: only *Achyranthes aspera* was founded more than 5% in ANEO. In group 1, mowing and herbicide regimes favored monocotyledonous species establishment. In group 1.1, late mowing favored the growth of shrubby species such as *Leucaena leucocephala* and perennial liana such as *Centrosoma pubescens*. In group 1.2, regular disruption of ground cover allowed the establishment of annual dicotyledonous species such as *Tridax procumbens*, *Vernonia cinerea* and *Cleome rutidosperma*. All these characteristics determined floral traits of weed management treatments, which allowed treatments to be categorized according to abundance of each trait (table 5.1.6). Treatments of group 1.2 showed the highest rates of 'free access' floral trait (between 31 to 43 % of flowers). The lowest rate was observed in group 2 (less than 10 %). The 'pale' floral trait was frequently observed in 70 % (AV) to 95 % (Group 2) of flowers. The 'large' floral trait was rarely seen except in LMV (20 % against less than 6 % for other treatments). Finally, means of FS ranged from 33.7 to 45.8 % with $GLY=LMV>PV=AV=ANeo=PNeo$.

5.1.3.2 Nectar Provisioning Indicator (NPI) scores

As suggested by differences between treatments with respect to FS, GC and SR, NPI differed significantly between treatments. Treatments LMV (5.9), PV (5.4), AV (5.2) and ANeo (5.1) had significantly higher NPIs than GLY (4.3) and PNeo (4.1) (Table 5.1.6).

Figure 5.1.2: Graphic representation of the multiple correspondence factorial analysis (MCFA). MCFA showed a polarization in two groups of treatments characterized by presence (Group 1) or absence (Group 2) of monocotyledonous species in plant communities. Group 1 subdivided into two subgroups: group 1.1 composed by monocotyledonous species and perennial dicotyledonous species (LMV treatment: late mowed spontaneous vegetation); group 1.2 composed by monocotyledonous species and annual dicotyledonous species (PV: 'perennial tactic' with spontaneous vegetation, AV: 'annual tactic' with spontaneous vegetation and GLY: 'herbicide tactic' with spontaneous vegetation). Group 2 characterised by the absence of monocotyledonous species and composed exclusively by *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae) (ANeo: 'annual tactic' with *N. wightii* and PNeo: 'perennial tactic' with *N. wightii*)

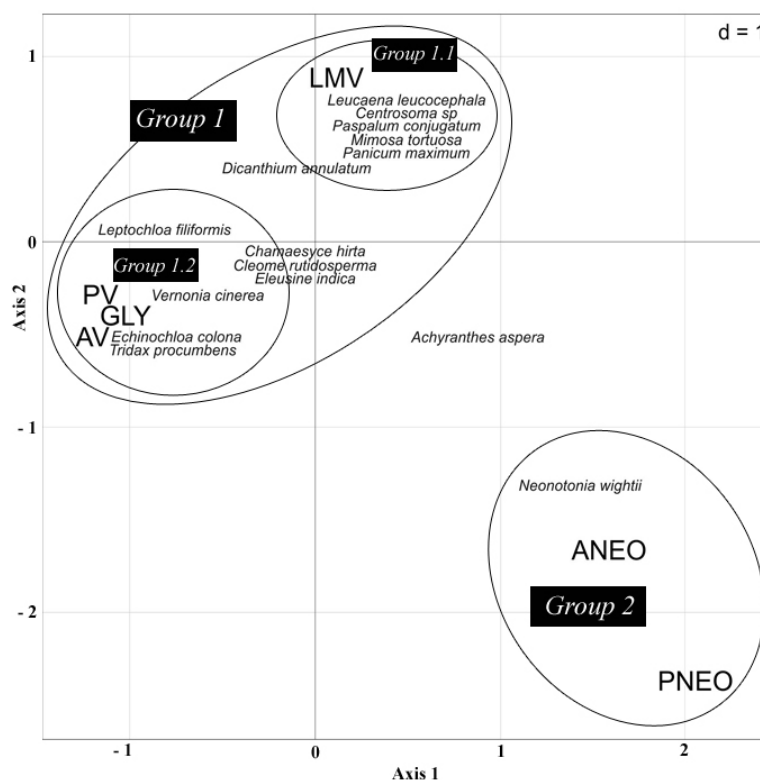
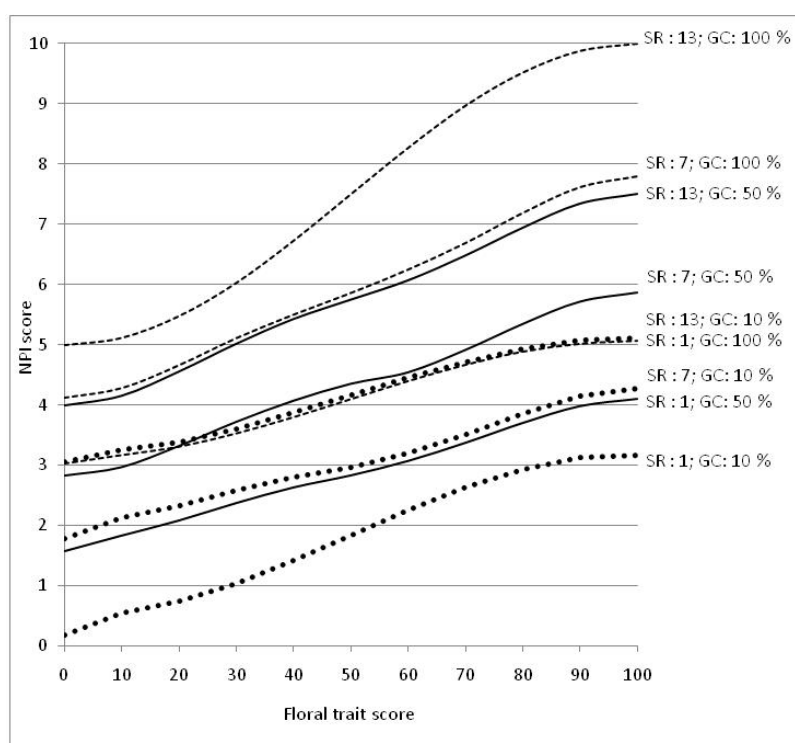


Figure 5.1.3: Sensitivity analysis of the Nectar Provisioning Indicator (NPI): theoretical evolution of NPI depending on variation in the input variables 'Floral Score' (FS) for 'Species Richness' (SR) and 'Ground Cover' (GC). Only the curves of the minimums, averages and maximums of these variables are represented: SR (1, 7 and 13 species); GC (10, 50 and 100%).



5.1.3.3 Evaluation of nectar provisioning

Three major pests were observed during the observation period: two aphids (*Toxoptera citricida* Kirkaldy and *Aphis spiraecola* Patch) and the green coffee scale (*Coccus viridis* Green). No significant difference between treatments was observed in time and space of the infestations. The biological control of pests by their natural enemies did not require biocide. In total, 1690 lacewing eggs were counted. Weed management treatments influenced the number of eggs. 68 to 90 eggs were observed in ANeo, AV, GLY and PV trees' treatments but only PNeo was significantly different from other treatments: PV>PNeo (p-value: 0.0084); AV>PNeo (p-value: 0.021); GLY>PNeo (p-value: 0.039); ANeo>PNeo (p-value: 0.045).

Considered individually, none of the weed species and floral traits revealed an influence on egg deposition by lacewings. However, we observed positive influences on the bio-indicator (30 eggs tree⁻¹ and more) when FS had a score > 35% (p-value: 0.012), when GC ≥ 65 % (p-value: 0.023) and when SR ≥ 7 (p-value: 0.035). Finally, aggregation of these three input variables in NPI revealed a positive influence on lacewing egg deposition (10 eggs tree⁻¹ and more) when NPI score was ≥ 5 (p-value: 0.028).

5.1.3.4 Sensitivity test results

Sensitivity analysis showed that the sigmoid tendency of curves (figure 5.1.3) had an effect on the increase in NPI: the more the values of input variables tended to their favourable conditions, the higher the NPI. The slopes of the curves were in agreement with the decision rules and were thus steeper when two variables out of three belonged to favourable conditions ($y=0.578x + 4.032$). In this case, NPI ranged from 5 to 10. When untested variables were set on unfavourable conditions, the variation of one species in 'Species Richness' resulted in 0.19 (±0.06) point of difference in NPI, and a 10% variation in 'Ground Cover' and 'Floral Score' resulted in 0.25 (±0.08) points of difference in NPI. When untested variables were set on mean conditions, the variation of one species in 'Species Richness' resulted in 0.24 (±0.09) point of difference in NPI, and a 10% variation in 'Ground Cover' and 'Floral Score' resulted in 0.30 (±0.12) point of difference in NPI. When untested variables were set on favourable conditions, variation of one species in 'Species Richness' resulted in 0.28 (±0.13) point of difference in NPI, and a 10% variation in 'Ground Cover' and 'Floral Score' resulted in 0.36 (±0.14) point of difference in NPI. On the whole, our decision rules coupled with the aggregation method led to an increase of NPI when the input variables tended towards favourable conditions. This trend became more marked when input variables reached two thirds of their favourable value (9 in case of 'Species Richness' and 70% in case of 'Floral Score' and 'Ground Cover'). Under these conditions, maximum NPI variations were highest. When input variables reached two thirds of their favourable value, the mean variation in maximum values ranged from 0.74 (±0.13) to 0.61 (±0.12) points in less favourable conditions.

5.1.4 Discussion

5.1.4.1 Impact of weed management on nectar provisioning

The number of agricultural weed practices influences the growth of vegetation (Akobunda *et al.*, 1999): a low level of disturbance (herbicide, mowing, tillage, etc.) has a positive effect on weed vegetation dynamics (Teasdale *et al.*, 2004), whereas too much disruption can have a negative effect (Gerowitt, 2003). Our study has supported these predicted effects. Weed management treatments had a significant effect on species diversity and composition in plant communities. Regular use of herbicides or mowing was shown to encourage the selection of monocotyledonous species whereas *N. wightii* in PNeo and ANeo fully excluded them. The number of agricultural weed practices also had a significant effect on plant communities. In group 1, the moderate use of mowing (one mowing year⁻¹) favored perennial dicotyledonous species (shrubs and lianas) in LMV, whereas frequent mowing favored annual dicotyledonous species in AV and PV. In group 2 (PNeo and ANeo), the moderate use or no use of herbicide in ANeo (one herbicide year⁻¹) and PNeo respectively, favored higher species richness. All these conditions influenced the characteristics of plant communities and nectar provisioning through weed selection with respect to their resistance to disturbance, as emphasized by Mas *et al.* (2007). The three floral traits of interest selected for nectar provisioning discriminated weed management treatments only when considered together. Accordingly, GLY and LMV obtained the highest FS, meaning that they are potentially the best treatments to attract flower-visiting insects. However, when floral traits are considered individually, their attraction efficiency can decrease. For example, in group 2, the ‘pale’ floral trait, an important one for attracting generalist insects (Makrodimos *et al.* 2008), was observed in more than 95% of flowers (related character of *N. wightii*). Therefore, other floral traits have to be considered to understand the overall weak attractiveness of PNeo and ANeo. Indeed, despite their pale colour, *N. wightii* flowers are much less attractive due to their small size and difficult access (cleistogamous flower) even for small generalist nectarivores (Nogueira-Couto *et al.*, 1998). Similarly, the ‘large’ floral trait does not determine flower accessibility by itself and has to be considered along with the ‘open access’ floral trait. The former was more present in LMV than in other treatments whereas the latter was less present in LMV. If the best FS was noted by GLY, this weed management treatment does not ensure a good stability of plant communities because of frequent chemical disturbance. At the opposite end of the spectrum, PNeo and ANeo proved to offer the best resource in quantity and stability (GC), while PV and AV the best resource in diversity (SR). Hence, higher aggregate information will provide useful insight in combining these individual parameters and for meeting the objective of our study.

5.1.4.2 Validation of Nectar Provisioning Indicator

Indicators are used to assess complex processes that often do not have quantitative equivalents (Bockstaller and Girardin, 2003). After creating an indicator, it is necessary to confirm its relevance and validate its applicability. According to Bockstaller and Girardin (2003), three kinds of validation are necessary: ‘the “design validation” to evaluate if the indicator is scientifically founded; the “output validation” to assess the soundness of the indicator outputs, and, the “end use validation” to be sure the indicator is useful and used as a decision aid tool’.

Rapport-Gratuit.com

This study has addressed the first two types of validation but still must consider the third kind of validation. Indeed, the NPI design is simple and includes three easy input variables: number of species, ground cover rates and floral traits. A comparison of indicator output with measured data would be ideal, but one basic problem in directly comparing measured and observed data is the lack of observed data due to the impossibility of measurement. In our case, how can one measure the real nectar provisioning of all the plant species in the different management treatments? The indirect evaluation of this nectar provisioning, based on a bio-indicator, showed the relevance of aggregating several variables. When considered individually, none of the weed species or floral traits revealed any influence on egg deposition by lacewings. However, we observed positive influences using this bio-indicator when floral traits are aggregated (FS input variable). Quantity, stability and diversity (GC and SR input variables) of plant species have also a positive influence on egg deposition by lacewings. Finally, positive influence on chrysopid egg deposition is observed when NPI scores are greater than 5. The fuzzy expert system and decision rules allowed to aggregate different types of variables and to make the information readable for the end user. Furthermore, sensitivity analysis showed that a slight variation (of around 10%) in the input variables (e.g. linked to a bad observation) has little impact on NPI score (0.19 to 0.74 point). All these results contribute to the validation of input variables and their mode of aggregation in NPI. For the last kind of validation ("end use validation"), NPI was designed using a participatory method in which the stakeholders and the end users were involved (Le Bellec *et al.*, 2011). Such an approach is also recommended and has already been used for validation (Cloquell-Ballester *et al.*, 2005). *Thus, an indicator will be validated if it is scientifically designed, if the information it supplies is relevant, if it is useful and used by the end users'* (Bocksaller and Giradin, 2003).

5.1.4.3 NPI: a decision aid tool for weed management

Our weed management treatments were classified through NPI in two statistically different groups: GLY and PNeo with NPI score <5 and LMV, PV, AV and ANeo with NPI score > 5. These scores have different causes and the transparency of NPI's construction throws light on the causes for differences in each score. The GLY score is explained by a small and irregular ground cover rate, while the PNeo score by a very low species richness. Results may seem contradictory because these two weed management treatments are opposed. However, since NPI scores have considered both the level of disturbance and the nectar provisioning capacity, NPI seems appropriate to predict the nectar-provisioning capacity of plant species for nectarivorous beneficial insects. Nevertheless, Mailloux *et al.* (2010), who studied the density and diversity of Phytoseiid mites in the same experimental design, showed that natural enemies of phytophagous mites, which are known to occasionally complement their diet with non-prey food including pollen and nectar, were more diverse and abundant in LMV, PNeo (the lowest NPI in our results) and ANeo. To contrast, GLY, AV and PV (the second highest NPI in our results) were very inhospitable for phytoseiid mites. Nevertheless, in both experiments, LMV and GLY provided respectively among the best and the worst NPI. This could be explained by the fact that both microclimatic conditions and vegetation architecture (rather than non-prey food sources), are important environmental features for these tiny predators, and prove that NPI is suitable for regular nectar-feeding arthropods rather than occasional ones.

So, what is the best weeding strategy for nectar provisioning in Guadeloupians' tropical orchards? GLY is not recommended due to habitat disturbance. LMV is not really a weed management tactic (shrubs species favored) but is excellent for field margins management. If mechanized weeding is not possible, ANeo should be preferred over PNeo because it seems to favour species diversity. If mechanized weeding is possible, PV and AV do not differ. Before making a decision, a multi-criteria analysis will be necessary to assess all environmental services (Soma and Norway, 2010), but also all negative effects of weed management treatments (e.g. decrease yields, extra supply water, etc.). NPI is a tool for decision aid in weeding management with respect to nectar provisioning for natural enemies of pests. It can also be used to simulate improvements and thus in *ex ante* assessments. For example, Ceballo and Walter (2005) identified two plant species (*Alpinia zerumbet* and *Datura candida*) for nectar provisioning to a parasitoid of mealybug (*Coccidoxenoides perminutus*) in a Queensland citrus orchard. They conclude that if provision of nectar enhances levels of parasitism in the field, integrating these plants into orchards may pose challenges. As such, the characterization of their floral traits shows a real interest as these two plant species possess the three ideal floral traits of our study ('large', 'pale' and 'free access'), but vegetative characteristics (shrubby or rhizoma species) limit their use as hedge or field margin plants. NPI can be used as a decision aid tool to choose between alternative non-cultivated vegetation options based on their potential impact on the conservation of beneficial and nectarivorous insects. However, NPI application to others conditions and/or interactions (ecology, nectar provisioning/nectar feeding...) remains to be studied.

Acknowledgments

We thank Andrea Pain for her linguistic support. This work was financially supported by the European Union (EAFRD) and the French office for the development of the agricultural economy of French overseas departments (ODEADOM).

5.2 Influence of ground cover management on diversity and density of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in Guadeloupean citrus orchards

Mailloux J.¹, Le Bellec F.^{1*}, Kreiter S.², Tixier M.S.², Dubois P.¹

¹ CIRAD, UPR Hortsys, Stn de Vieux-Habitants, Vieux-Habitants, 97119 Guadeloupe, France

² Montpellier SupAgro, UMR CBGP, bâtiment 16, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier cedex 02, France

Received: 16 October 2009

Accepted: 28 April 2010

* Corresponding author

Experimental Applied Acarology **52**, 275-290

Abstract: The abundance and diversity of phytoseiid mites in the vegetal ground cover of a citrus orchard were surveyed by monthly samplings from October 2008 to July 2009. Six different vegetal cover management methods were studied: herbicide application without mowing (Gly), mowing without herbicide application (PV), mowing with herbicide application (AV), late mowing without herbicide application (LMV), cover crop (*Neonotonia wightii*, Fabaceae) without herbicide application (PNeo) and cover crop with herbicide application (ANeo). Eleven species were present in the ground cover, with *Phytoseius rex* and *Proprioseiopsis mexicanus* as major species. Species richness and densities (1.5 ± 4.5) in the Gly item were very low, except for one sample four months after herbicide treatment. The AV and PV items showed poor diversity and very low mite densities (1.2 ± 2.6 and 1.4 ± 1.5 , respectively). The LMV item showed the highest diversity and high density of phytoseiid mites (6.9 ± 8.8). The ANeo and PNeo items also showed generally high diversity, but with variations in time and exhibited the highest density of phytoseiid mites (13.5 ± 12.7 and 13.4 ± 9.1 , respectively). *Neonotonia wightii* as the cover crop seems to act as a reservoir of phytoseiid mites, sustaining abundant and diverse populations all year round. Some naturally occurring plant species such as *Achyranthes aspera*, *Amaranthus dubius* and *Eleutheranthera ruderalis* could also constitute favourable host plants for Phytoseiidae. Results are discussed in relation to the potential of collected phytoseiid species as candidates for biological control of phytophagous mites on Guadeloupean citrus orchards.

Keywords: Phytoseiidae - Ground cover - Citrus groves - *Neonotonia wightii* - Biological control of phytophagous mites

5.2.1 Introduction

Phytophagous mite species, especially the citrus rust mite, *Phyllocoptruta oleivora* (Ashmead) (Acari: Eriophyidae), and the broad mite, *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae), cause serious damage on citrus fruits worldwide (Gerson 1992; Browning 1999). In order to control these mites in an integrated pest management context, action thresholds have been developed in Florida and in Guadeloupe (de Roffignac 2006; Childers *et al.* 2007). Biological control could also be an interesting alternative way to limit chemical treatments and to control pest mites in citrus orchards. Many phytoseiid mites can be considered as important biological control agents for phytophagous mites (McMurtry 1982). Generalist predators can feed and develop on various kinds of food: phytophagous mites (such as eriophyids, tarsonemids, tydeids), eggs or immature stages of insects (including scale crawlers, thrips, aleyrodids), pollen, nectar and (other) plant exudates, honeydew, and fungi (McMurtry and Croft 1997). *Euseius victoriensis* Womersley was, for example, successfully used in Australia to control the mite pests *P. oleivora*, *P. latus*, *Tegolophus australis* Keifer (Eriophyidae), *Brevipalpus* mites (Tenuipalpidae) and *Tetranychus urticae* Koch (Tetranychidae) in citrus orchards (Beaulieu and Weeks 2007).

The importance of vegetal diversity in agroecosystems was pointed out for promoting the occurrence of natural enemies and thus enhancing biological control (Landis *et al.* 2000). Studies conducted in vineyards and orchards showed that high densities of many species of phytoseiid mites are observed in surrounding vegetation (Tuovinen and Rokx, 1991; Tixier *et al.* 1998; Kreiter *et al.* 2002; Duso *et al.* 2003; Toyoshima *et al.* 2008). Ground cover could also be a reservoir for natural enemies by providing refugia and alternative food, as well as places to breed (Gravena *et al.* 1993). However, few studies have been carried out on the occurrence of phytoseiid mites on ground cover in citrus orchards. Muma (1961) observed higher numbers of phytoseiid mites in citrus orchards with cover crops than without. Gravena *et al.* (1993) showed that the presence of *Ageratum conyzoides* L. (Asteraceae), a common wild plant in Guadeloupe, and *Eupatorium pauciflorum* Humboldt, Bonpland and Kunth (Asteraceae) in citrus orchards in Brazil led to an increase of phytoseiid mite densities, compared to a bare ground management. As a consequence of increased phytoseiid mite densities damage caused by *P. oleivora* decreased. In this case, not only the presence of a ground cover matters, but also the choice of plant species. Actually, *A. conyzoides* was shown to release airborne chemicals that maintain the *Amblyseius newsami* (Evans) population for a long time (Kong *et al.* 2005). Huang *et al.* (1978) also showed that the presence of *A. conyzoides* in citrus groves in China increased phytoseiid mite densities. In addition, ground cover could be important for weed control that is the major problem in Guadeloupean citrus orchards. In Guadeloupe the climate allows year-round germination and growth of weeds, making weeds strong competitors for water and nutrients against citrus trees, especially young trees (Le Bellec *et al.* 2009b). Ground cover plants that compete with weeds for water, nutrients and light, can help control them and reduce herbicide applications.

Table 5.2.1: Description of the six ground cover treatments and treatments dates

Treatments	Vegetal cover type	Management of vegetal cover	Treatment dates
Glyphosate Gly	Resident vegetation	Regular herbicide application (Glyphosate)	August 7 th , September 23 rd , November 24 th 08, February 2 nd and May 26 th 09
Annual resident vegetation AV	Resident vegetation	Regular mowing	September 22 th , October 30 th 08, January 13 th and June 26 th 09
		Annual herbicide application (Glyphosate) in case of hydric stress of citrus trees	March 13 th 09
Perennial resident vegetation PV	Resident vegetation	Regular mowing	September 17 th , October 30 th 08, January 13 th and March 25 th 09
		No herbicide application since January 2008	
Late mowed vegetation LMV	Resident vegetation	One mowing a year	April 28 th 09
Annual Neonotonia ANeo	Leguminous cover crop <i>Neonotonia wightii</i> Wight and Arnott	Herbicide application (Glyphosate) before sowing	August 1 st 08
		Leguminous cover crop sowing	August 19 th 08
		Herbicide application (Fusilad) to facilitate <i>N.wightii</i> establishment	September 23 rd 09
		Annual herbicide application (Glyphosate) in case of hydric stress of citrus trees	March 23 rd 09
Perennial Neonotonia PNeo	Leguminous cover crop <i>N. wightii</i>	Herbicide application (Glyphosate) before sowing	August 1 st 08
		Leguminous cover crop sowing	August 19 th 08
		Hand-weeding to facilitate <i>N.wightii</i> establishment	September 23 rd 09

The present paper aims to determine the effect of different ground cover management methods on abundance and diversity of phytoseiid mites. Current farming practices (herbicide, mowed vegetation) were compared to proposals recently developed for reducing herbicide use (late mowed vegetation, cover crop). A further aim was to determine which plants could be favourable to phytoseiid mites, and which phytoseiid species could be interesting for efficient pest mite control.

5.2.2 Material and method

5.2.2.1 Site and meteorological conditions

The 3150 m² field trial took place in Guadeloupe (16°N, 61°W), in CIRAD's 'Le Bouchu' station, Vieux-Habitants (west coast of the island, on the lee shore at an altitude of 24 m). The climate is tropical with an annual rainfall average of about 1000 mm and a marked dry season. From July to December, during the humid season, the monthly rainfall average is about 106 mm, against barely 40 mm during the dry period from January to June. The soil presented a sand:silt:clay ratio of 43:23:34. Soil pH was 6.5, with an organic content of 2.5%. After one herbicide treatment (glyphosate; Glyphos®; 360g/l; Cheminova Agro A/S) on the whole surface on 5 January 2008, the orchard was planted on 21 January 2008 with 1-year-old plants of *Citrus sinensis* L. cv. 'Late Valencia' grafted to *Citrus volkameriana* L. (plantation density of 5 × 7 m).

A Campbell CR800® (Campbell Scientific, France) data acquisition system was used to monitor meteorological conditions (solar radiation, temperature, relative humidity, wind speed and rainfall). Tinytag® (Gemini, UK) data loggers were used to monitor temperature inside the vegetal cover. One of these recorders was placed in a plot of each treatment.

5.2.2.2 Treatments

A randomized block experimental design, with six ground cover treatments (Table 5.2.1) and five replicates per treatment, was settled in August 2008. The 30 experimental plots, of 105 m² each, were separated by a 1-m-high shade net. The six ground cover treatments are as follow: (1) GLY: spontaneous natural vegetation, regularly sprayed with glyphosate; (2) AV: annual vegetation; spontaneous natural vegetation, regularly mowed and may be sprayed once a year with glyphosate in case of hydric stress of citrus trees; (3) PV: perennial vegetation; spontaneous natural vegetation, regularly mowed but do not receive any herbicide application; (4) LMV: late mowed vegetation; spontaneous natural vegetation, mowed only once a year; (5) ANeo: annual *Neonotonia wightii* (Wight and Arnott); a sown leguminous cover crop that may be sprayed once a year with glyphosate in case of hydric stress of citrus trees; (6) PNeo: perennial *N. wightii*; cover crop that does not require any intervention except manual clearing around citrus trees. Note that the terms 'annual' and 'perennial' when they apply to ground covers do not refer to the biology of incriminated plants but to the ground cover persistence.

Rapport-Gratuit.com

GLY represents the most current weeding practice in Guadeloupean citrus orchards (Le Bellec *et al.* 2009a). Glyphosate ([N-phosphomethy] glycine) is a systemic, non selective, broad spectrum and post-emergence herbicide. It targets annual, biannual and possibly perennial herbs in cultivated areas (Schneider *et al.* 2009). The PV, AV, ANeo and PNeo treatments were developed for limiting the use of herbicides. PV is currently practiced by citrus growers once mechanization is workable. ANeo and PNeo consist in a leguminous *N. wightii* cover ground. This latter plant was chosen as cover ground because previous results showed that it is hardly competitive to other weeds (Le Bellec *et al.* 2009b). LMV treatment comprises a single mow per year to prevent shrubby vegetation to settle. To avoid water competition between citrus trees and vegetal covers, the plant water status was managed by measuring trunk diameter variations using a micrometric system, Pepista® 808 (Agro-technologie, France). Sensors were applied to the trunks of fifteen trees (three for each treatment) and the MNTD (minimum daily trunk diameter) was calculated. Considering the citrus tree growth in the Gly treatment as a reference, irrigation in other treatments was calibrated to limit any differences between citrus trees. If MNTD exceeded 20% of MNTD in the Gly treatment, we added 10% of the water quantity to the trees concerned. Furthermore, when trees stopped growing in the annual treatments (ANeo and AV) for more than 15 days (constant MNTD), a glyphosate treatment was applied to reduce water competition (13 and 25 March 2009 for AV and ANeo, respectively) (Ortuno *et al.* 2008). No insecticide or miticide treatments were applied during the trial. A fungicide, i.e. Aliette flash® (fosetyl aluminium, 80%, Bayer Cropscience, France) was applied on 27 February 2009 to control *Phytophthora* spp.

5.2.2.3 Sampling, identification and data analysis

Samplings were carried out monthly from October 2008 to July 2009. For each date, the sampling protocol consisted of haphazardly throwing a 30-cm-wide wooden frame on the ground cover of the thirty plots (six treatments, five replicates per treatment). All plants were identified and all vegetation was cut and added to a 1-l bottle. Mites were removed from the vegetation by the ‘dipping-checking-washing of leaves’ method (Boller 1984). Phytoseiid mites were then counted under a stereomicroscope (40× magnification), and mounted in Hoyer’s medium on slides and identified under a calibrated interference contrast microscope (200×). The generic classification of Chant and McMurtry (2007) was used for identification of Phytoseiidae. In order to compare species diversity and its variation over time, Simpson’s diversity index *D* was used. This index takes into account the number of species present as well as the relative abundance of each species in a single index, thus an equitability index is not needed. The Simpson’s diversity index formula is:

$$D = \sum n_i(n_i - 1) / N(N-1),$$

where n_i is the number of individuals in the *i*-th identified species and *N* is the total number of individuals of all species on each site. *D* measures the probability that two individuals randomly selected from a sample belong to the same species. In order to make the interpretation more obvious, (1-*D*) was used instead of *D*.

Figure 5.2.1: Temperature and rainfall dynamics at the experimental station from August 2008 to July 2009

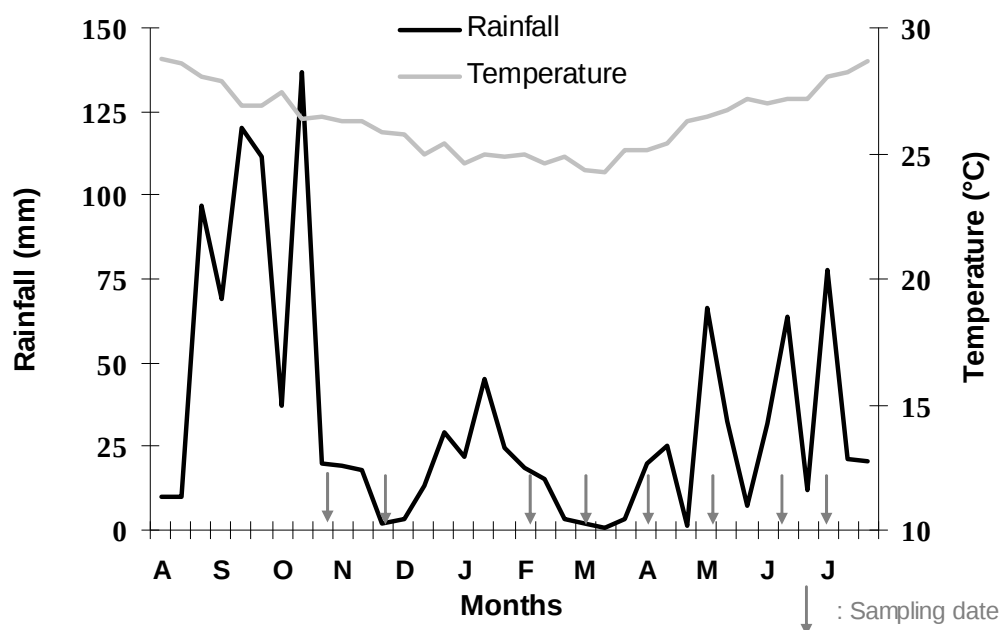
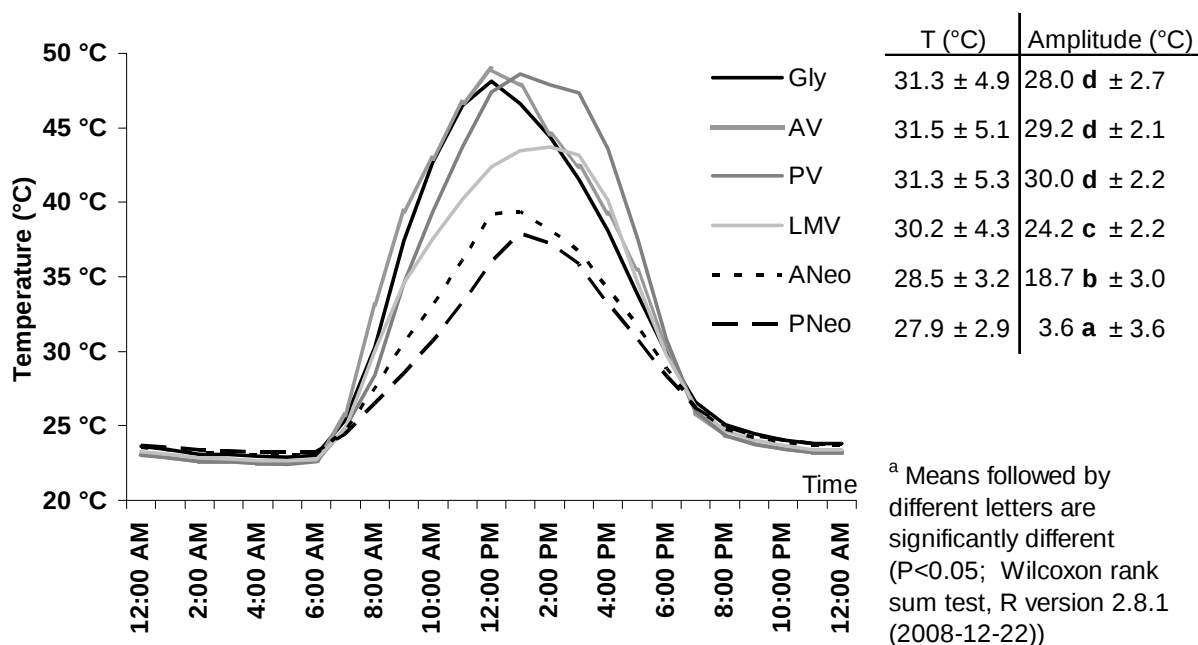


Figure 5.2.2: Daily temperature changes, mean temperature and daily amplitude inside the vegetal cover



The value of $(1-D)$ ranges between 0 (1 species) and 1 (infinite diversity). That is, the higher the value of $(1-D)$, the higher the diversity (Simpson 1949). For each treatment, the countings of the five replicates was pooled.

As the data 'density of mites' did not have a normal distribution, a non-parametric ANOVA (Kruskal-Wallis test) and a mean comparison test (Mann-Whitney U test) were carried out in order to evaluate differences in phytoseiid densities between the different treatments (using R version 2.8.1, 2008-12-22). First, the eight samples were pooled to analyze the global effect of cover management method and then the same comparison tests were done date by date.

5.2.3 Results and discussion

5.2.3.1 Meteorological survey

Meteorological conditions during the trial

The annual rainfall from August 2008 to July 2009 was about 1,200 mm (figure 5.2.1). As usually, the first dry period appeared in December and the real dry season started in mid-February. However, this season was short: it finished in April, whereas usually it goes on until May. Air temperature average was 26.3°C during the whole trial. February, March and April samplings correspond to the dry period, whereas the October, November, May, June and July samplings correspond to the humid season.

Microclimatic conditions inside ground cover

No difference in mean temperature inside the ground cover was observed between the different treatments. However, significant differences between the treatments were observed in daily amplitudes (figure 5.2.2). The highest values were noted in the Gly, AV and PV treatments. In these treatments, the soils were indeed more exposed to sunlight even if between two manipulations (herbicide application or mowing) the vegetation grew. Daily amplitudes in the LMV, ANeo and PNeo treatments were significantly different from each other. The lowest value was observed in the PNeo treatment, followed by ANeo (one herbicide application in April) and LMV (once mowing in April).

Figure 5.2.3: Densities of phytoseiid mite species collected from covers between October 2008 and July 2009

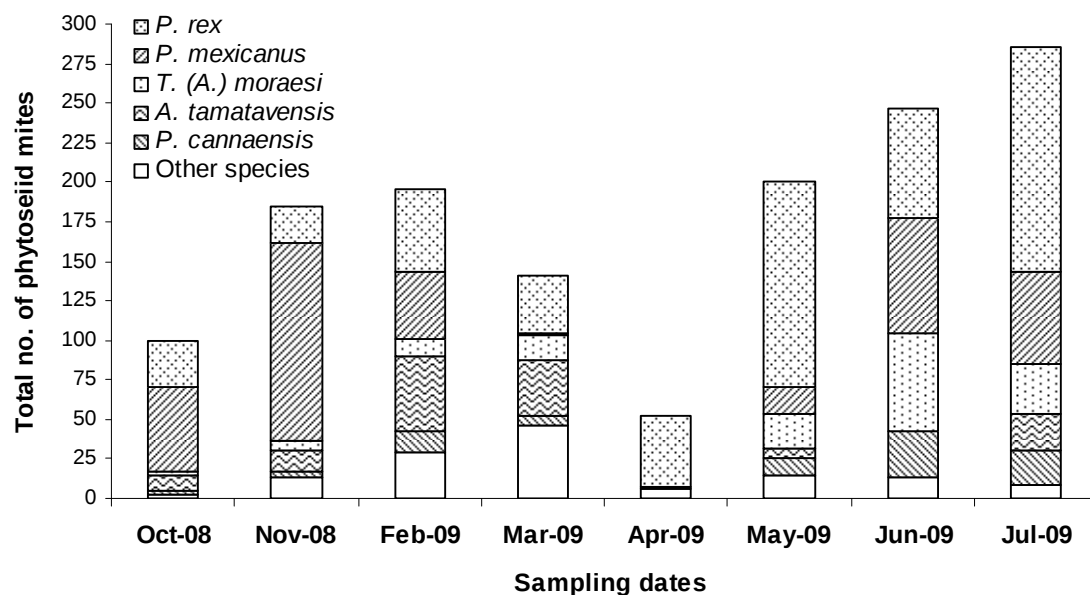


Table 5.2.2: Phytoseiid mite species found in the whole survey

Subfamily	Phytoseiid species	Total number of specimens
Amblyseinae	<i>Amblyseius aeralis</i> (Muma)	16
	<i>Amblyseius largoensis</i> (Muma)	1
	<i>Amblyseius tamatavensis</i> Blommers	135
	<i>Euseius ovaloides</i> (Blommers)	1
	<i>Neoseiulus baraki</i> (Athias-Henriot)	26
	<i>Neoseiulus longispinosus</i> (Evans)	30
	<i>Proprioseiopsis cannaensis</i> (Muma)	88
	<i>Proprioseiopsis mexicanus</i> (Garman)	367
	<i>Typhlodromips</i> new sp	59
Typhlodrominae	<i>Typhlodromus (Anthoseius) moraesii</i> Kreiter and Ueckermann	153
Phytoseinae	<i>Phytoseius rex</i> De Leon	529
Total of identified specimens		1405

5.2.3.2 Phytoseiid mite diversity

Table 5.2.2 lists the phytoseiid species collected in all treatments. In total, 1,479 phytoseiid mites were collected and 1,405 specimens were identified to species level. It was impossible to identify the 74 (5%) specimens left because of their bad state or immature status. Eleven species were found in the ground cover. Among them, *Phytoseius rex* De Leon and *Proprioseiopsis mexicanus* (Garman) constituted the main species found, contributing 37.7 and 26.1%, respectively. High densities of *Typhlodromus* (*Anthoseius*) *moraesi* (Kreiter and Ueckermann) (10.9%), *Amblyseius tamatavensis* (Blommers) (9.6%) and *Proprioseiopsis cannaensis* (Muma) (6.3%) were also recorded. The six remaining species contributed only to 9.4% of the total diversity observed, and two of them were sampled only once. All species were known from Guadeloupe, except *T. (A.) moraesi*, which had only been reported from La Réunion Island (Kreiter et al. 2002) and *Typhlodromips* n. sp., which is new to science.

Phytoseiid mites were present all year round, but their diversity varied over time (Figure 5.2.3). *Proprioseiopsis mexicanus* was more abundant during the humid than during the dry season ($W=14$; $P=0.036$). However, for the other species, no difference between dry and humid season was noted.

Regarding phytoseiid species diversity in the different ground cover treatments, we exclusively considered the nine species for which more than one specimen was observed. Eight species were present in the Gly treatment, the main species being *P. mexicanus* (33%). For most sampling dates, the Simpson diversity index value was very low. However in November, the Simpson diversity index value was high (Table 5.2.3), but densities were very low (seven specimens, five species). In May (4 months after glyphosate application), the index value was also high and densities increased (42 specimens, six species). High species richness could be found for a long time (4 months) after a glyphosate application. Seven and six species were found in AV and PV vegetal covers, respectively. At each date, fewer less than five species were recorded, showing that species richness was low in the mowed treatments.

The highest index value in the AV treatment is 0.58, representing only three species and 11 specimens. The highest index value of the PV treatment was 0.74, representing nine specimens belonging to five species. In LMV cover, the nine species were recorded, mainly *P. rex*, *T. (A.) moraesi*, *A. tamatavensis* and *P. mexicanus*. The indices were always higher than 0.40. LMV mite diversity was higher than in the AV and PV treatments, suggesting that management with almost no mowing could maintain a significant and stable diversity on the ground cover. Twenty-one plant species were observed in this treatment. This plant diversity could be linked to Phytoseiidae diversity, as shown by several authors in surveys carried out in uncultivated areas (Tuovinen and Rokx 1991; Barbar *et al.* 2005).

Eight phytoseiid species were collected in ANeo and PNeo. The two main species for both treatments were *P. rex* (42%) and *P. mexicanus* (23%). Except for the two first sampling dates, the indices were similar. These differences at the beginning of the experiment could be due to different management actions. The first herbicide treatment eliminated grass weeds and encouraged a greater floral diversity of broadleaf species in ANeo. In PNeo, the flora quickly became monospecific because of the hand-weeding performed to favour *N. wightii*. The greater plant diversity in ANeo could have favoured phytoseiid diversity.

Table 5.2.3: Simpson's diversity index values in each vegetation cover from October 2008 to July 2009.

	October-08	November-08	February-09	March-09	April-09	May-09	June-09	July-09
Gly	0.00	0.78	NA	NA	0.00	0.55	NA	0.33
AV	0.32	0.00	0.58	0.00	NA	NA	0.13	0.00
PV	0.21	0.00	0.22	0.74	NA	0.37	0.32	0.24
LMV	0.59	0.72	0.78	0.81	0.44	0.67	0.63	0.40
ANeo	0.64	0.38	0.74	0.69	NA	0.45	0.71	0.62
PNeo	0.12	0.03	0.78	0.70	0.08	0.44	0.74	0.70

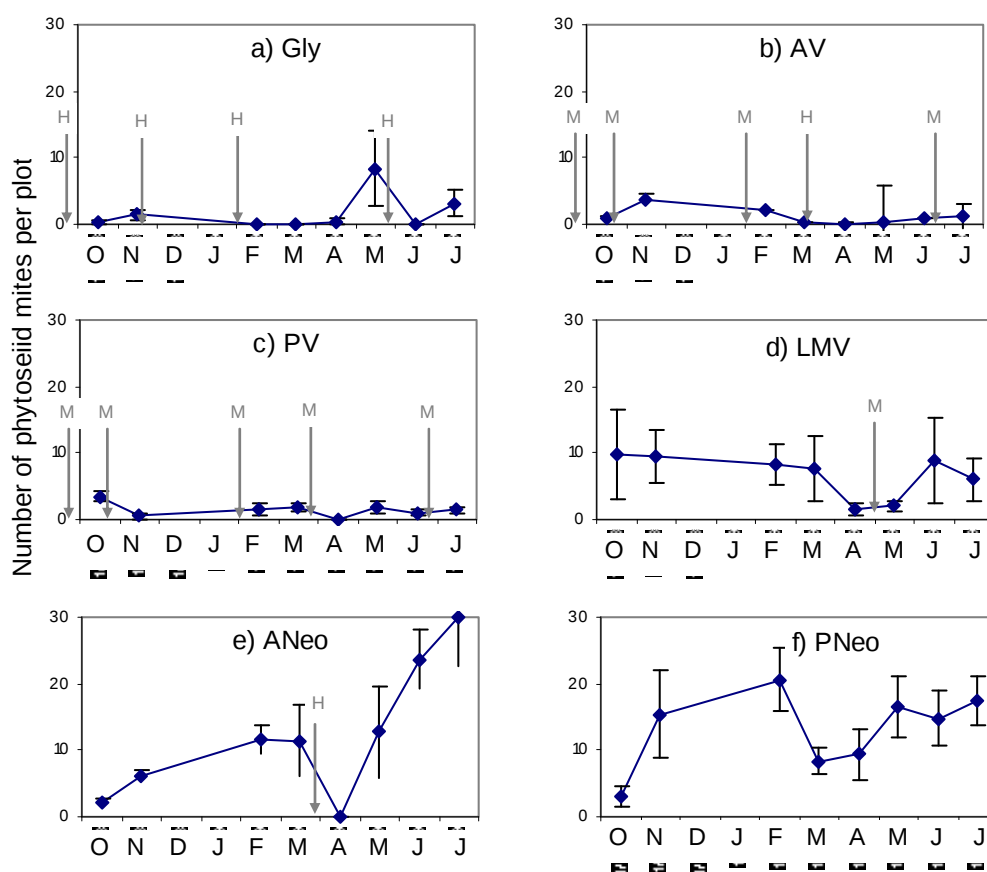
NA : Not Applicable (species richness = 0)

Table 5.2.4: Mean ($\pm$ SE) number of phytoseiid mites per treatment from October 2008 to July 2009.

	Oct-08	Nov-08	Feb-09	March-09	April-09	May-09	June-09	July-09	Total
Gly	0.4 a $\pm$ 0.3	1.4 a $\pm$ 0.8	0.0 a $\pm$ 0.0	0.0 a $\pm$ 0.0	0.4 a $\pm$ 0.4	8.4 bcd $\pm$ 5.8	0.0 a $\pm$ 0.0	3.2 ab $\pm$ 0.8	1.5 a $\pm$ 4.5
AV	1.0 ab $\pm$ 0.5	3.8 ab $\pm$ 3.5	2.2 ab $\pm$ 1.4	0.4 a $\pm$ 0.4	0.0 a $\pm$ 0.0	0.2 a $\pm$ 0.2	1.0 b $\pm$ 0.5	1.2 a $\pm$ 0.6	1.2 a $\pm$ 2.6
PV	3.4 bc $\pm$ 0.8	0.6 a $\pm$ 0.4	1.6 b $\pm$ 0.8	1.8 b $\pm$ 0.7	0.0 a $\pm$ 0.1	1.8 ab $\pm$ 1.0	1.0 b $\pm$ 0.5	1.4 a $\pm$ 1.9	1.4 a $\pm$ 1.5
LMV	9.8 c $\pm$ 6.8	9.6 bc $\pm$ 4.0	8.2 c $\pm$ 3.1	7.6 bc $\pm$ 4.8	1.6 b $\pm$ 0.9	2.0 bc $\pm$ 0.9	8.8 c $\pm$ 6.5	6.0 b $\pm$ 3.4	6.9 b $\pm$ 8.9
ANeo	2.2 c $\pm$ 0.4	6.2 b $\pm$ 0.8	11.6 c $\pm$ 2.1	11.4 c $\pm$ 5.3	0.0 a $\pm$ 0.2	12.8 cd $\pm$ 6.9	23.6 d $\pm$ 4.5	30.0 c $\pm$ 7.4	13.5 bc $\pm$ 12.7
PNeo	3.0 bc $\pm$ 1.6	15.4 c $\pm$ 6.6	20.6 c $\pm$ 4.7	8.4 c $\pm$ 1.9	9.4 c $\pm$ 3.8	16.6 d $\pm$ 4.6	14.8 cd $\pm$ 4.1	17.4 c $\pm$ 3.6	13.4 c $\pm$ 9.1
df = 5	H = 9.85	H = 16.26	H = 23.72	H = 16.84	H = 16.78	H = 14.88	H = 23.80	H = 21.80	H = 26.66
	P = 0.0795	P = 0.0061	P = 0.0002	P = 0.0049	P = 0.0049	P = 0.0108	P = 0.0002	P = 0.0005	P < 0.0001

^a Means within the same column with no letters in common are significantly different between treatments ($P < 0.05$)

Figure 5.2.4: Seasonal densities of phytoseiid mites (mean number $\pm$ SE) per plot and per sampling and treatments applications (H = herbicide; M = Mowing). a) Gly; b) AV; c) PV; d) LMV; e) ANeo and f) PNeo.



In April, 21 days after herbicide application, no phytoseiid mites were found. The leguminous cover crop grew back quickly and permitted a rapid 'secondary' colonisation by phytoseiid mites.

5.2.3.3 Phytoseiid mite density

In October 2008, 87 days after start of the experiment (1 August 2008), phytoseiid mites were observed in the ground covers (100 specimens in total) (Figure 5.2.3). The densities increased in November and February and then declined in March and April. In April, the mite densities were low, most likely due to drought and vegetation destruction caused by herbicide application for the treatments ANeo and AV. In May 2009 (beginning of humid season), high densities of phytoseiid mites were observed and increased in June reaching 300 specimens in July. However, it is not possible to set a seasonal effect on phytoseiid mite density off against these fluctuations as others factor such as ground cover treatments could be involved.

Overall, the highest densities of phytoseiid mites over the year were observed for the treatments PNeo (13.4 mites per plot), ANeo (13.5 mites per plot) and LMV (6.9 mites per plot) (Table 5.2.4). On the opposite, the lowest phytoseiid mite densities were recorded in Gly (1.5 mites per plot), AV (1.2 mites per plot) and PV (1.4 mites per plot) treatments; no difference was observed between these three treatments ($H = 1.23$, $df = 2$, $P = 0.54$).

Even if previous results show that some cover management practice could shelter higher phytoseiid mite densities than others, a date-by-date analysis is essential to determine whether this general trend varies over time. In the Gly treatment (Figure 5.2.4a), mite densities were always very low, except in May (8.4 mites per plot) and July (3.2 mites per plot). It seems thus that after herbicide application, phytoseiid mites disappeared (when we collected the mulch, we did not find any phytoseiid mites in it). This may be due to suppression of plant resources (indirect effect) but also to glyphosate toxicity. Hislop and Prokopy (1981) observed 100% *Neoseiulus fallacis* Garman mortality when treated with glyphosate in the laboratory, after collection from apple orchards. Kreiter and Le Menn (1993) showed a toxic effect of glyphosate on *Neoseiulus californicus* (McGregor) both under field and laboratory conditions. Nevertheless, we observed a high phytoseiid mite density in the Gly cover, 112 days after herbicide treatment.

For AV and PV (Figure 5.2.4b,c), mite densities were always low, and no relation between time after mowing and phytoseiid numbers was observed. Although PV did not receive any herbicide after January, unlike AV, which received two herbicide treatments (one in August 2008, another in April 2009), there was no significant difference in phytoseiid densities between these two treatments, except in March. Even if mowing did not totally eliminate the vegetal cover, this practice may destroy the habitat of predacious mites in the same way as the herbicide did.

In the LMV treatment (Figure 5.2.4d), which included only a single mowing, higher mite densities were observed than in the treatments AV and PV, with mowing every 2 months. Even if the highest densities at the first sample date were observed on this treatment, they declined regularly afterwards to reach 1.6 mites per plot in April. This decrease can be due to drought (the plants had dried out during this period). After this date, we decided to mow LMV to promote sprouting of new seeds for the new wet season. From May to July, phytoseiid mites increased again, reaching 6 mites per plot in July, 76 days after mowing.

Table 5.2.5: Plant species and associated phytoseiid species. N = plant collection frequency. Numbers between parentheses indicate the numbers of mite specimens found on the respective plants.

Plant species	N	Phytoseiid species
<i>Achyranthes aspera</i> Linnaeus	2	<i>A. tamatavensis</i> (3) ; <i>P. mexicanus</i> (3) ; <i>P. cannaensis</i> (2) ; <i>P. rex</i> (7) ; <i>T. (A.) moraesi</i> (35)
<i>Amaranthus dubius</i> Martius ex Thellung	1	<i>Typhlodromips</i> n sp (39)
<i>Eleutheranthera ruderalis</i> (Swartz) Schultz Bipontius	1	<i>P. rex</i> (27) ; <i>T. (A.) moraesi</i> (1)
<i>Tridax procumbens</i> Linnaeus	2	-
<i>Vernonia cinerea</i> (Linnaeus)	2	<i>P. mexicanus</i> (2)
<i>Cleome rutosperma</i> Candolle	2	-
<i>Cleome viscosa</i> Linnaeus	1	-
<i>Croton lobatus</i> Linnaeus	2	<i>Typhlodromips</i> n sp (15)
<i>Macroptilium lathyroides</i> (Linnaeus)	2	<i>Typhlodromips</i> n sp (7) ; <i>P. rex</i> (9) ; <i>T. (A.) moraesi</i> (6)
<i>Neonotonia wightii</i> (Wight and Arnott)	27	<i>A. aeralis</i> (3) ; <i>A. tamatavensis</i> (29) ; <i>E. ovaloides</i> (1) ; <i>N. baraki</i> (15) ; <i>N. longispinosus</i> (27) ; <i>P. mexicanus</i> (34) ; <i>P. cannaensis</i> (25) ; <i>P. rex</i> (256) ; <i>T. (A.) moraesi</i> (23)
<i>Mimosa tortuosa</i> Linnaeus	1	<i>P. rex</i> (1)
<i>Chloris inflata</i> Link	1	<i>P. mexicanus</i> (1)
<i>Echinochloa colona</i> (Linnaeus)	9	<i>P. mexicanus</i> (1)
<i>Panicum maximum</i> Jacquin	9	<i>A. tamatavensis</i> (5) ; <i>N. baraki</i> (5) ; <i>N. longispinosus</i> (2) ; <i>P. mexicanus</i> (4) ; <i>P. cannaensis</i> (4) ; <i>Typhlodromips</i> n sp (1) ; <i>T. (A.) moraesi</i> (6)
<i>Spermacoce assurgens</i> Ruiz et Pavon	1	-

In the ANeo and PNeo treatments (Figure 5.2.4e, f), the highest overall numbers of mites were observed. No significant differences in mite density were observed between these two modalities, except in November and April (Table 5.2.4). Before November, herbicide treatment was applied on the ANeo treatment that could reduce the mite number directly (toxicity) or indirectly (by reducing the vegetation). The annual herbicide was applied on ANeo 20 days before the April sample, which can explain why no phytoseiid mite was observed at this date. However, the number of mites increased quickly after the treatment. Sixty-one days after herbicide application, there were no more differences between ANeo and PNeo. Despite the herbicide application, *N. wightii* did not die and it grew again just as in the PNeo modality. PNeo did not receive any treatment except the herbicide before sowing in August and hand-weeding. During this survey, the increase of phytoseiid populations was rapid after the planting of the cover crop. At the beginning of the experiment, there were on average 3, 15.4 and 20.6 mite specimens per plot sample, at 3, 4 and 6 months after sowing, respectively. In April and March, the densities decreased, most likely because of the drought (vegetal cover growth reduced), but increased afterwards.

If we compare the daily temperature data with the mite densities in each treatment, it appears that where mites were exposed to the highest daily temperature the densities were lowest (Gly, AV and PV). This observation agrees with the conclusions of Liang and Huang (1994). Microclimate with lower temperature and higher humidity in the ground cover crop can provide a good habitat for phytoseiid mites, allowing increased densities.

5.2.3.4 Phytoseiid host plants

Wild host plants for Phytoseiidae

Table 5.2.5 lists the plant species collected. Most plants were sampled only once or a few times. The highest phytoseiid mite densities were observed on *Achyranthes aspera* L., *Amaranthus dubius* Mart. ex Thell. (both Amaranthaceae), *Macroptilium lathyroides* (L.) (Fabaceae) and *Eleutheranthera ruderalis* (Sw.) Sch. Bip. (Asteraceae). None of the Asteraceae species (*Tridax procumbens* L. and *Vernonia cinerea* [L.]), highly present in mowed vegetation (AV and PV), hosted many phytoseiid mites. This could explain the low density observed in these treatments. Even if these species can provide pollen and nectar, they did not seem to provide a habitat to phytoseiid mite species commonly encountered in this survey.

Neonotonia wightii: a good cover crop to host phytoseiid mites

Nine mite species were observed on *N. wightii*, in high densities (27 individual plants sampled, on average 15 mite specimens per plant). *Phytoseius rex* was found on all 27 plants. Various factors could explain why this cover crop hosted an abundant density and diversity of phytoseiid mites. At first, *N. wightii* can provide an abundance of food items for the phytoseiid mites. The role of plants in providing substrates for colonisation, water, pollen and pilosity is important for phytoseiid mites, especially for generalist species (McMurtry and Croft 1997).

Table 5.2.6: Information about some phytoseiid mites found on citrus orchard grounds

Phytoseiid species	Observation	References
<i>Amblyseius largoensis</i>	feeding on different stages of <i>P. latus</i> in lab	Ramos and Rodriguez 2006
	feeding on <i>Panonychus citri</i>	Kreiter et al. 2006
	collected on citrus trees in Guadeloupe	unp. data 2008
	observed on citrus fruits in experimental station (Guadeloupe)	
<i>Amblyseius aeralis</i>	observed in association with <i>P. latus</i> on citrus fruit in Madagascar and in South Africa	Penna et al. 1989
	collected on citrus trees in Guadeloupe	Kreiter et al. 2006
<i>Amblyseius tamatavensis</i>	widely observed in association with <i>P. latus</i> on papaya in Brazil	Collier et al. 2004
	observed in association with <i>P. latus</i> on papaya in Cuba	Ramos and Rodriguez 1997
	only phytoseiid recorded on citrus in Madagascar and South Africa	Grout 1994
	collected on citrus trees in Guadeloupe	Kreiter et al. 2006
	observed on citrus fruits in experimental station (Guadeloupe)	unp. data 2008
<i>Neoseiulus longispinosus</i>	observed in association with <i>P. latus</i> and <i>P. oleivora</i> on citrus can not reproduce only on <i>P. latus</i>	Kongchuensin et al. 2005
<i>Phytoseius rex</i>	collected on citrus trees in Guadeloupe	Kreiter et al. 2006
<i>Proprioseiopsis mexicanus</i>	one of the most abundant mites on citrus leaves in USA	Fadamino et al. 2009

Mites of a variety of families other than Phytoseiidae (Eriophyidae, Tarsonemidae and Tetranychidae) were encountered (but not counted) on *N. wightii*, which can be alternative foods for generalist predators. Moreover, *N. wightii* was often blooming all year round, and could also provide pollen. Also factors such as leaf structure may affect mite density (Karban *et al.* 1995; Kreiter *et al.* 1999, 2002). *Neonotonia wightii* is densely pubescent with long and rusty hair on pods and both leaf surfaces. Its pilosity could be favourable to phytoseiid mites in providing a favourable microclimate with higher humidity and lower temperature, in increasing number of oviposition sites, protection from macro-predators, and capacity for trapping wind-blown pollen grains (McMurtry and Croft 1997; Kreiter *et al.* 2002).

Species observed on plants with highly pubescent leaves such as *N. wightii* are generally small with narrow body shape, and species of the genus *Phytoseius* are frequently recorded on such plants (McMurtry and Croft 1997). An alternative to herbicide application could consist of sowing a *N. wightii* cover crop or in preserving some of the wild plants met on the orchard floor to increase phytoseiid mite density and diversity in the citrus groves. More investigation, especially more collections of host plants, will be useful for discriminating between natural weeds in Guadeloupean orchards, in order to find out the best suitable host plants for phytoseiid mites.

5.2.3.5 Potential of the phytoseiid species as control agents

Phytoseiid mites found in the covers belong to the genera *Amblyseius*, *Proprioseiopsis*, *Typhlodromips*, *Phytoseius*, *Typhlodromus* and *Neoseiulus*. According to McMurtry and Croft's classification (1997), they belong to types III and IV. For these types, eriophyiid mites (like *P. oleivora*) vary as prey from unfavourable to highly favourable. Other families of mites preyed upon include tarsonemid mites (as *P. latus*). It is usually assumed that phytoseiid mites of type III would be useful in conservation biological control strategies especially with outdoor and perennial crops as citrus orchards (McMurtry and Croft 1997; Kreiter *et al.* 2005).

Few studies deal with the predation efficiency of the phytoseiid species herein recorded on *P. oleivora* and *P. latus* (Table 5.2.6). More research is needed to determine the ability of these phytoseiid species to regulate these pest mites. *Amblyseius tamatavensis*, which was directly observed in Guadeloupe on citrus fruits, and recorded in Brazil and Cuba in association with *P. latus* on papaya (Ramos and Rodriguez 1997; Collier *et al.* 2004), could be an interesting species as it is well represented in ground cover, present on citrus fruits and able to feed on *P. latus*. *Proprioseiopsis mexicanus*' biology has not been studied much. It was one of the prevailing phytoseiid species on citrus orchards in Alabama (Fadamiro *et al.* 2009).

Also more work is needed to evaluate the capacity of phytoseiid mites in colonizing the neighbouring citrus trees. Actually, it may be that the phytoseiid mites from the ground cover do not go into the trees (Nyrop *et al.* 1994). By growing cover crops near citrus trees, phytoseiid mites may move more easily to citrus fruit. Furthermore, inoculation of cover plant leaves with natural enemies directly on citrus trees may solve the problem of moving. In a study conducted on a Californian citrus orchard, when *Euseius tularensis*-infested cover crops were cut and placed in young citrus trees that had low densities of predacious mites, densities on trees significantly increased (Grafton-Cardwell *et al.* 1999). It would be useful to study whether artificial transfer would significantly accelerate the migration of phytoseiid mites into citrus trees.

5.2.4 Conclusion

Cover management affected phytoseiid mite densities recorded on the vegetation. Herbicide application or mowing seems to reduce phytoseiid densities. Even if the densities can increase again after these treatments, every 2 months these numbers are drastically reduced. Thus, reducing mowing frequency could be a good alternative to let phytoseiid mites develop in the ground cover, as the LMV management results indicated. *Neonotonia wightii* appeared to be a good cover crop for hosting numerous predacious mites. Further studies are needed to evaluate the potential of the predacious mite species encountered as control agents of *P. oleivora* and *P. latus*, the two major pest mites of Guadeloupean citrus orchards. To complete this survey, samples on trees would be needed to determine the similarities between ground cover and citrus diversities and densities over time. The characterization of dispersal from cover crop to trees is also a key point to determine how cover crop management could directly affect tree biological control. For this, the use of traps as well of molecular typing are planned (Tixier *et al.* 2006).

CHAPITRE 6

EVALUATION MULTICRITÈRE DES EFFETS DES PROTOTYPES DE GESTION DE L'ENHERBEMENT A L'AIDE D'INDICATEURS

Ce chapitre, section 6.1, correspond à l'article à soumettre à *Agricultural systems*, intitulé « Multicriteria assesement of weed management in tropical orchard by means of indicators». Son objectif est de réaliser une évaluation multicritère des effets induits par un changement de pratique, ici le mode de gestion de l'enherbement des jeunes vergers d'agrumes. Cette évaluation sera réalisée à l'aide d'indicateurs construits sur la base des critères d'évaluation décidés par les acteurs. Cette forme et méthode ont été choisies pour permettre de restituer des résultats lisibles à ces mêmes acteurs. Une synthèse et une illustration des principaux résultats de cette évaluation multicritère seront réalisées en section 6.2.

6.1 Multicriteria assessment of weed management in tropical orchard by means of indicators

Le Bellec F.^{1*}, Rajaud A.², Dubois P.¹, Mailloux J.³, Calabre C.¹, Vingadassalon F.¹,
Bockstaller C.⁴

¹ CIRAD, UPR103, TA B-103/PS4, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5, France

² CIRAD, UPR103, Stn de Bassin Plat, B.P. 180, 97455 Saint-Pierre, France

³ ASSOFWI, 830 route du Bouchu, 97119 Vieux-Habitants, Guadeloupe, France

⁴ INRA, UMR1121, IFR 110, BP 20507, 68021 Colmar, France

* lebellec@cirad.fr

Agricultural systems (à soumettre)

Abstract: A multi-criteria assessment tool with appropriate indicators is the only answer to today's need for sustainable innovation of agricultural weed management. This paper describes the steps used to measure the effects of changing agricultural practices with a set of appropriate indicators. We evaluated new weed management techniques in citrus orchards in agreement with farmers' objectives for redesigning their cropping system. This comparative study is based on the principles of a systematic approach. A decision tree was built to resolve previously defined problems, and a set of indicators was created to assess whether stakeholders' objectives are achieved. Two types of indicators were defined. The first quantitatively evaluates the performance of each weeding practice with respect to water and energy consumption, and the second can be used to predict the environmental impacts of each method including erosion control, and disturbance of the agro-ecosystem. Certain indicators included several input variables that were aggregated using a fuzzy expert system. This indicator-based method proved to be flexible and enabled the construction of performance indicators or transparent indicators, which will facilitate their use as decision-making tools for stakeholders. Our multi-criteria analysis enables us to recommend sustainable weed management techniques for young orchards that correspond to the current constraints facing orchards in Guadeloupe.

Keywords: Agricultural practices impact – Innovation – Bio-indicators – Cover crop – Participatory approach – Decision-aid tool – Pesticides

6.1.1 Introduction

Improving their agricultural practices to respect the principles of sustainable development is becoming increasingly urgent for many farmers due either to the societal demands or to new production standards imposed by national legislators or commercial firms (Haverkort *et al.*, 2008). Regardless of the reason for doing so, redesigning cropping systems raises the question of how to measure the effects of changing agricultural practices.

Indicator-based monitoring tools are frequently used to assess sustainability (Bezlepina *et al.*, 2011). Indeed, indicators are a viable alternative to direct measurements, not only to foresee impacts for which the dependent variables are often difficult to measure and/or are costly and time consuming to acquire but also to produce a result that stakeholders can easily understand (Mitchell *et al.*, 2005; Bockstaller *et al.*, 2008). However, many indicators focus on a limited number of aspects of sustainability, most of which are economic or ecological. In addition, the reasons for the choice of a particular indicator are rarely explained (Meul *et al.*, 2008). A multi-criteria assessment tool with appropriate and easily understandable indicators is the best solution research can offer to respond to the need for sustainable development (Andalecio, 2010; Soma and Norway, 2010).

To respect the improvement objectives of cropping systems chosen by the stakeholders, the assessment criteria have to be precisely defined (Nolot and Debaecke, 2003). Stakeholders' expectations need be taken into account right from the first stages of developing the indicators to reduce the gap between the developers and the users of the indicators (Cloquell-Ballester *et al.*, 2006).

The aim of the present study was to assess the effects of changing agricultural practices. The study was conducted in the context of the development of sustainable agriculture and uses a set of appropriate indicators. Since we foresee that our multicriteria grid will be used as a decision-making tool to help change agricultural practices, particular care was taken to make it user friendly. Here we describe how the method was applied to a process for the improvement of citrus cropping systems in Guadeloupe (French West Indies) where weed management appeared to be a key element in the innovation of the cropping systems (Le Bellec *et al.* 2011a). The citrus sector is now a priority in the rural development program in Guadeloupe, to reply to local demand for citrus fruits, which is currently mostly covered by imports. But, along with improved weed management, producers need to reduce inputs, in accordance with the objectives of the French 'Ecophyto 2018' plan (Ecophyto, 2008).

Our study comprised four successive steps:

- (1) transforming the improvement objectives of the cropping system into appropriate criteria to evaluate the effects of changing management practices;
- (2) designing indicators to monitor progress toward sustainability;
- (3) aggregating the indicators to make them easy to understand by stakeholders;
- (4) applying the multicriteria grid to evaluate the effects of changing agricultural practices.

Table 6.1.1: Improvement objectives and evaluation criteria of citrus crops in Guadeloupe (Le Bellec *et al.*, 2011a). Transformation of criteria into indicators for the multi-criteria assessment. TFI: Treatment Frequency Index, CED: Cumulative Energy Demand, API: Agricultural Practice Impact, IPHY: Pesticide Indicator, NPI: Nectar Provisionning Indicator.

Objectives	Criteria	Indicators	Type of indicator and aggregation	Variables involved	Indicator unit
Maintain yield	Trees (yield)	I-PERF	Qualitative / Decision tree	Trunk diameter and tree health	Score 0 to 10
Reduce impact of pesticides	Pesticides	TFI ¹	Quantitative / None	Active ingredient : Dose applied and surface treated	Number of doses ha ⁻¹
Reasonable water use	Water	I-WATER	Quantitative / None	Water supply	m ³ ha ⁻¹
Reasonable energy demand	Energy consumption	CED	Quantitative / None	Direct and indirect energy consumption (fertilizers, biocides, petrol...)	MJ ha ⁻¹
Reasonable cost demand	Cost	I-COST	Quantitative / None	Running costs of production	€ ha ⁻¹
Maintain social balance	Labor	I-LABOR	Quantitative / None	Amount of labour required to operate	h ha ⁻¹
Fight soil erosion	Ground cover stability and agrosystem resilience	API	Qualitative / Decision tree	Frequency of ground cover disturbance (mowed / herbicide), ground cover rate and biomass.	Score 0 to 10
Reduce impact of pesticides	Pesticides	IPHY	Qualitative / Decision tree	Soil and habitat characterizations, type of sprayer, characteristics of active ingredient	Score 0 to 10
Reduce need for pesticides	Agrosystem resilience	NPI	Qualitative / Decision tree	Floral functional traits (3 variables), ground cover rate and plant species richness.	Score 0 to 10

6.1.2 Materiel and methods

6.1.2.1 Transformation of the improvement objectives into appropriate evaluation criteria

As reported in a previous paper (Le Bellec *et al.*, 2011a), a participatory method for redesigning the existing cropping system was chosen. First, the results of an agronomic diagnosis performed by researchers were passed on to a multi-stakeholder working group. This working group included 10 representatives of all the stakeholders identified in the local citrus sector (a grower, a dealer, institutional and ecological stakeholders). The three main objectives of the new citrus cropping systems were to: i) focus the required reduction in plant protection products on herbicides (based on the conclusions of the agronomic diagnosis), ii) develop a more eco-friendly cropping system (to extend the ecological services of the cropping system, i.e. to base the cropping system on agro-ecological management, rather than on phytosanitary management), which should iii) promote high quality citrus production in Guadeloupe. The stakeholders themselves selected the evaluation criteria (table 6.1.1) to be used to evaluate the direct and indirect effects of redesigning the citrus cropping system as a function of the improvement objectives.

6.1.2.2 Selection, adaptation or design of indicators

To concretize the evaluation criteria, we selected, adapted and, when necessary, designed nine appropriate indicators (table 6.1.1) based on a move toward sustainable agriculture, as requested by the stakeholders.

- I-PERF measures the impact of crop management on yield.
- The treatment frequency index (TFI) measures the amount of biocides used. The index was calculated as follows: $TFI = \sum [(DA \times S^2 \text{ treated}) / (DH \times S^2 \text{ plot})]$, where DA is the dose applied to the plot, DH the minimum approved dose per ha, and S^2 the square of the treated and total surface area of the plot. TFI followed the recommendations of the 'Ecophyto 2018' plan (Ecophyto, 2008).
- Water consumption (I-WATER) measures the impact of crop management on renewable natural resources.
- Cumulative energy demand (CED) (Frischknecht *et al.*, 2003) measures the impact of crop management on non-renewable natural resources.
- ICOST measures the impact of crop management on production costs.
- ILABOR measures the labour required for crop management.
- Impact of agricultural practices (API) (based on Mailloux *et al.*, 2010) measures the level of disturbance of the agro-ecosystem.
- IPHY based on I-Pest (Van der Wef and Zimmer, 1998) evaluates the risk of pesticides polluting the groundwater, surface water and air.

- Nectar provisioning indicator (NPI) (Le Bellec *et al.*, 2011b) evaluates the capacity of the crop management strategy to control pests using conservation strategies and particularly by supplying alternative food (nectar) for beneficial insects (Wäckers, 2004).

For three of the indicators (I-PERF, API, and NPI), not enough knowledge was available to derive a quantitative indicator based on an equation, and developing a quantitative approach would have resulted in a complex model impossible to implement (Bockstaller *et al.*, 2008). For each indicator, we identified the main qualitative and/or quantitative variables to be aggregated using a decision tree. This enables the indicators to be expressed in language that is easy to understand (Phillis and Andriantiatsaholainain, 2001). To perform the aggregation, we chose a method based on a fuzzy expert system used for agri-environmental indicators in the same way as for another indicator, IPHY (Van der Werf and Zimmer, 1998). The approach based on fuzzy subsets avoids the effects of knife-edge limits of classes. The system can be used to aggregate different types of variables using expert scientific knowledge. The aggregation procedure can be summarized in four steps:

(1) Identification of representative variables.

(2) Definition of their favorable (F), unfavorable (U) and fuzzy range. We based membership on data available in the literature or, in the absence of specific knowledge, impartially (minimum to maximum values possible). Sigmoid lines were used to calculate the degree of membership of the input variables in the fuzzy subsets F and U:

Membership of subset F = $(0.5 (\sin (\pi \times (((v-a)/(b-a))-0.5)))) + 0.5$

Membership of subset U = $(0.5 (\cos (\pi \times ((v-a) / (b-a)))) + 0.5$

where 'v' is the observed value of the input variable, 'a' and 'b' are threshold values, 'a' is a minimum value (total membership of subset U) and 'b' is a maximum value (total membership of subset F).

(3) Definition of the weight of each variable in the expert system.

(4) Final calculation of the indicator with the expert system. We used Sugeno's inference method (Van der Werf and Zimmer, 1998) to compute the final aggregation of NPI. Sugeno's inference method uses decision rules and the formula:

$$\text{Score} = \frac{\sum \text{conclusion of the rule} \times \min (\text{membership degree of each decision rule's premise})}{\sum \min (\text{membership degree of each decision rule's premise})}$$

To make the results easier to read by the user, we present them in the form of a performance score (0-10), in which a score of 7 or above is considered acceptable (Bockstaller *et al.*, 2008).

Table 6.1.2: Decision rules governing the score allocation of I-PERF (0-10). F: Favourable conditions; U: Unfavorable conditions. Thresholds allocated to trunk diameter increasee from year 1 to year 3 and tree health status governing the membership of favorable and unfavorable subsets of the performance indicator I-PERF.

Condition of I-PERF input variables			Conclusion of decision rules: I-PERF score
	Increase in trunk diameter (%)	Tree health status (0 to 10)	Score
Subsets	<i>If F ($\geq 150^*$)</i>	<i>and F ($=10$)</i>	<i>then 10</i>
Subsets	<i>If F ($\geq 150^*$)</i>	<i>and U ($=0$)</i>	<i>then 5</i>
Subsets	<i>If U (≤ 75)</i>	<i>and F ($=10$)</i>	<i>then 5</i>
Subsets	<i>If U (≤ 75)</i>	<i>and U ($=0$)</i>	<i>then 0</i>
Fuzzy logic	from 75 to 150	from 0 to 10	

*Davies and Albrigo, 1998

Table 6.1.3: Decision rules governing the score allocation of API, (0 to 10). F: Favorable conditions; U: Unfavorable conditions. Thresholds allocated to disturbance with the number of interventions, Percentage ground cover and biomass cover governing the membership of favorable and unfavorable subsets of the indicator API (impact of agricultural practice).

Condition of API input variables				Conclusions of decision rules: API score
	Number of agricultural weed operations	Ground coverage	Biomass	Score
Subsets	<i>If F ($\leq 1^*$)</i>	<i>and F ($\geq 90^{**}$)</i>	<i>and F ($\geq 10^{**}$)</i>	<i>then 10</i>
Subsets	<i>If F ($\leq 1^*$)</i>	<i>and F ($\geq 90^{**}$)</i>	<i>and U ($= 0$)</i>	<i>then 8</i>
Subsets	<i>If F ($\leq 1^*$)</i>	<i>and U (≤ 65)</i>	<i>and F ($\geq 10^{**}$)</i>	<i>then 5</i>
Subsets	<i>If F ($\leq 1^*$)</i>	<i>and U (≤ 65)</i>	<i>and U ($= 0$)</i>	<i>then 3</i>
Subsets	<i>If U ($\geq 5^*$)</i>	<i>and F ($\geq 90^{**}$)</i>	<i>and F ($\geq 10^{**}$)</i>	<i>then 5</i>
Subsets	<i>If U ($\geq 5^*$)</i>	<i>and F ($\geq 90^{**}$)</i>	<i>and U ($= 0$)</i>	<i>then 3</i>
Subsets	<i>If U ($\geq 5^*$)</i>	<i>and U (≤ 65)</i>	<i>and F ($\geq 10^{**}$)</i>	<i>then 3</i>
Subsets	<i>If U ($\geq 5^*$)</i>	<i>and U (≤ 65)</i>	<i>and U ($= 0$)</i>	<i>then 0</i>
Fuzzy logic	from 2 to 4	from 65 to 90	from 0 to 10	

* Mailloux et al., 2010; **Roose, 1994

The composite indicator I-PERF (impact of crop management on yield) aggregates two agronomic variables required to ensure high yields: tree growth and tree health status. Tree growth was evaluated by trunk diameter measured in mm (Davies and Albrigo, 1994). Health status was evaluated with a qualitative indicator corresponding to tree health on a scale of 0 to 10. A grade of 0 was attributed to dying or dead trees; a grade of 2 to trees in poor condition; a grade of 4 to trees in fairly poor condition, a grade of 6 to trees in average condition with a few phytosanitary problems; a grade of 8 to trees in satisfactory conditions, but with some minor phytosanitary problems; and a grade of 10 to trees in highly satisfactory condition. Threshold values and the decision criteria for the aggregation of the two variables are listed in table 6.1.2, sigmoid lines were chosen to determine the values of favorable or unfavorable subsets. Due to lack of knowledge, we decided to give the same weight to the two input variables, which explains the value of the conclusions.

API (impact of agricultural practices) includes three variables: the number of treatments (mechanical and chemical) of the ground cover, the average ground coverage, and ground cover biomass. We decided to give a greater weight to the number of treatments and ground coverage than to biomass. The first two variables are supposed to compensate each other. If one is favorable then the other is unfavorable, and the indicator has the same value in each case. The number of ground cover treatments is related to the level of disturbance of the agro-ecosystem. This disturbance was measured using a bio-indicator. Predatory mites belonging to the family Phytoseiidae (Acari: Mesostigmata) were chosen as a bio-indicator of the impacts of agricultural practice on agro-ecosystem functioning (Zacharda, 2001). Threshold values and the decision criteria for the aggregation of the three variables are listed in table 6.1.3; sigmoid lines were chosen to determine the values of favorable or unfavorable subsets.

We adapted IPHY (risk of pesticide pollution) to include the characteristics of the tropical citrus orchards used in this study as well as the cultivation of species not included in the original IPHY, which was designed for European cropping conditions. The main modifications were adjusting biocide application rates (rates were based on leaf area index, LAI), distinguishing two periods of risk (dry and wet seasons), and increasing KH values (Henry's constant) to assess the risk of increased biocide volatilization due to the tropical climate, and recognizing recorded rainfall measurements.

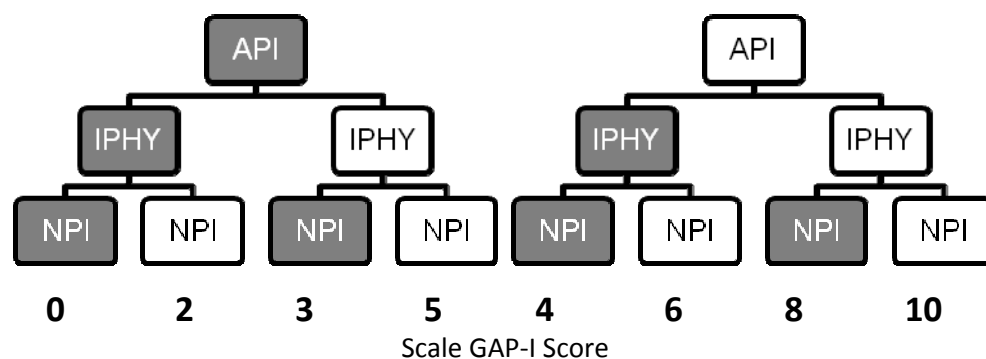
To build NPI (nectar provisioning indicator), three easily observable floral traits (flower morphology, corolla color and corolla size) were used along with two other input variables (species richness and ground coverage). Indirect evaluation of nectar provisioning in weed management treatments was based on the lacewing (Neuroptera: Chrysopidae).

6.1.2.3 Aggregation of the indicators

First, a score ≥ 7 of the I-PERF indicator was a precondition for further evaluation, as good general condition of the trees was deemed essential. If I-PERF was <7 , crop management was assumed to be impracticable.

Secondly, to perform a multicriteria assessment of changes in crop management, we aggregated indicators in three modules using the same aggregation procedure based on a fuzzy expert system:

Figure 6.1.1: GAP-I decision tree for score allocation based on the acceptable (white boxes) or unacceptable (grey boxes) scores of the three sub-indicators API (agricultural practice impact), IPHY (pesticide indicator) and NPI (nectar provisionning indicator).



- GAP-I (Good Agricultural Practices Indicator) predicted the environmental impact of the practice. GAP-I aggregates API, IPHY, and NPI. The weight of these three sub-indicators in the construction of GAP-I was based on the following rules (figure 6.1.1): groundcover stability evaluated by API was considered to be crucial in tropical settings particularly to reduce the risk of erosion (Roose, 1994). We consequently gave the greatest weight to this variable and an intermediate weight to IPHY, which addresses the water and air quality issues of more living organisms than NPI. Under these rules, conditions that were wholly unfavorable for API necessarily led to a score of ≤ 5 . However, a condition that was wholly favourable for API associated with conditions that were wholly unfavorable for IPHY and for NPI also led to a low score (≤ 4). In the end, to obtain an acceptable GAP-I score (>7), API must be wholly favorable, NPI must be wholly favorable, and IPHY at least partially favorable. Only wholly favorable conditions for the three sub-indicators led to the maximum GAP-I score of 10.

- NRC (Natural Resource Consumption) aggregated the indicators CED (cumulative energy demand) and I-WATER (water consumption) and provided information about the level of renewable or non-renewable natural resources. Both indicators were given equal weight. The threshold value (7) was based on the consumption of the reference treatment, GLY, to allow comparison of crop management strategies with respect to the current practice.

- ICOST (impact of crop management on production costs) by itself comprised the third unit and provided information about the labor cost of each crop management strategy. The acceptable threshold value (7) was also based on the costs of the current practice, GLY.

The indicators TFI (treatment frequency index) and I-LABOR (labor requirements) were not included in this final aggregation because ICOST already accounts for the labour time from I-LABOR, and the impacts of TFI are included in IPHY.

6.1.2.4 Case study: new weed management practices in citrus orchards

Study site

The 3-year trial (2008-2009-2010) was conducted in Guadeloupe (16°04'N and 61°44'W) at Vieux-Habitants (on west coast of the island, on the lee shore, elevation 24 m). According to the FAO classification, the soil is a fluvisol (2.5% organic carbon; particle size distribution: 34% clay, 23% silt, 43% sand, pH 6.5). The natural vegetation is a more or less degraded tropical dry forest (xerophilous vegetation). The climate is tropical with average annual rainfall of 1 048 mm and an average temperature of 26.4 °C in the three years of experimentation. The rainfall distribution is characterized by a dry season lasting 4 to 7 months. During the three years of the study, the average monthly rainfall in the dry season was 29 mm compared to 144 mm in the wet season (July to December). On January 21, 2008, after one herbicide treatment (glyphosate 4 L ha⁻¹; Glyphos®; 360 g L⁻¹; Cheminova Agro A/S) of the whole surface area and after 2 years of set-aside, the orchard was planted with 75 one-year-old plants of *Citrus sinensis* L. cv. 'Late Valencia' grafted onto *Citrus volkameriana* L. at a density of 5 x 7 m. The plot was exposed W-SW, with an average slope of 10% towards a permanent river located 10 meters from the nearest edge of the plot.

Prototypes of new practices tested: experimental design

We compared five weed management prototypes designed by a second working group composed of growers, a technical adviser and researchers (Le Bellec *et al.* 2011a). A randomized block experimental design was set up with the five prototypes and five replicates. The 25 experimental plots (105 m² with 3 trees each) were separated by a 1 m high shade net. The five prototypes differed in ground cover vegetation and frequency of mowing or herbicide use as follows: (1) PV (control 1): perennial spontaneous vegetation mowed with a portable brush cutter commonly used by farmers, which is the only equipment suited to the riprap and sloping fields of Guadeloupe; PV is the weed management part of the reference crop management but is not often used by farmers. (Le Bellec *et al.*, 2001a); (2) GLY (control 2): spontaneous vegetation regularly sprayed with herbicide (glyphosate); GLY is the weed management practice currently used in Guadeloupe; (3) AV: annual spontaneous vegetation mowed with the portable brush cutter plus chemical weed control. Glyphosate was regularly applied around the tree, and the whole surface area was sprayed once a year before the dry season to limit competition for water between weeds and citrus trees; (4) ANeo: annual cover crop sown every year using the leguminous *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), plus chemical weed control. Glyphosate was applied around the tree, and the whole surface area was sprayed once a year before the dry season to limit competition for water between weeds and citrus trees; (5) PNeo: perennial cover crop with *N. wightii*; managed like perennial vegetation PV and cleared around citrus trees by hand with no herbicide treatment. *N. wightii* was chosen because previous results showed that it was highly competitive with other weeds (Mailloux *et al.*, 2010).

Agricultural practices and input rates required for the management of the trees (water, fertilizer 14 N – 4 P – 10 K for young citrus trees, biocides for pest management) were consistent with reference crop management recommendations for citrus in Guadeloupe (Le Bellec *et al.* 2011a). However, to avoid competition between ground cover and trees, controls were analyzed to adjust the input rates of each prototype when necessary; if a supplementary application of one of the inputs was deemed necessary, it was applied to the five replicates of the prototype concerned.

Firstly, water supply was calculated at 85% of potential evapotranspiration (PET) (FAO, 2010). To avoid water competition between citrus trees and ground cover, plant water status was managed by measuring the minimum daily variations in trunk diameter (MNTD); MNTD was chosen as an indicator of early water stress (Ortuno *et al.*, 2008). Taking citrus tree growth in the GLY prototype as a reference (since competition is the lowest), in the other treatments, irrigation was calculated to limit any differences between citrus trees. According to the results of Ortuno *et al.* (2008), when the MNTD of the prototype exceeded 20% of the MNTD of the GLY prototype, we added 10% of the original quantity of water. This decision rule was applied during the first year of experimentation and was increased (when MNTD exceeded 20% of the MNTD of the GLY prototype, we added 20%) from the second year on as different growth rates were observed. Stakeholders chose 20% as the maximum acceptable supplementary addition. Concerning the water supply, PET values (mm day⁻¹) came from our meteorological station (CR800®, Campbell Scientific, France) and were calculated using the Penman-Monteith formula. To measure MNTD, we used a micrometric system (Pepista 808®, Agro-technologie, France). Sensors were applied to the trunks of 15 trees (three trees per prototype, selected randomly among the five replicates with two measurements of h⁻¹).

Table 6.1.4: Inputs per ha., fertilizer (nitrogen: 14%, phosphorus: 4% and potassium: 10%), water supply, petrol, herbicides and other biocides according to weed management prototypes used in the citrus orchard trial (January 2008 to December 2010): PV: mowed perennial spontaneous vegetation, GLY: spontaneous vegetation sprayed with glyphosate, AV: mowed annual spontaneous vegetation, ANeo: annual cover crop with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PNeo: perennial cover crop with *N. wightii*.

	Fertilizer in kg (14-4-10)			Water	Petrol	Herbicide	Other Biocides
	Year 1	Year 2	Year 3	m ³ year ⁻¹	l year ⁻¹	l year ⁻¹	kg year ⁻¹
PV (control 1)	171	325	582	5500	173	2.70	0.8
GLY (control 2)	171	325	582	4900	0	6.10	0.8
AV	171	325	582	5355	142	2.70	0.8
ANeo	171	325	582	5490	0	3.85	0.8
PNeo	171	325	582	5825	0	0	0.8

Secondly, annual manure application in each prototype was reevaluated as a function of soil and leaf analyses. To adjust fertilization rates, soil analyses (three samplings per elementary plot at two depths, 0-20cm and 20-40 cm, and the analysis of pH, N, OC, Ca, Mg, K, and Na) were conducted on January 4, 2008 and on December 15 in 2008, 2009, and 2010. Leaf analyses (samples of 40 leaves x 3 trees per elementary plot; analysis of N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, and B) were performed on November 10 in 2008, 2009, and 2010. Thirdly, epidemiological monitoring of trees was performed monthly on all 75 trees, which enabled biocide treatments to be adjusted to the tolerance thresholds of the different parasites found in crops in Guadeloupe. Inputs are summarized in table 6.1.4.

Collection of indicator input variables: sampling, measurement and data analysis

For the input variables of IPERF, the health status of trees and trunk diameter (measured 20 cm above the graft point) were assessed on all 75 trees on January 31, 2008 and on November 8, 2010.

For the input variables of TFI, I-WATER, CED, ICOST and ILABOR, all inputs (water, fertilizer, biocides) and labor time supplied to each prototype were recorded for each of the 25 elementary plots (five prototypes, five replicates per prototype) and for the duration of the study (from January 21st, 2008, to December 31st, 2010). CED calculations were made with SimaPro® software using the Ecoevent database. CED was considered as the sum of all direct and indirect energy costs, including the cost of transporting inputs to the plot. The energy costs of the water distribution network and of water storage (hill reservoir, residence time >30 years) were not taken into account as the water distribution system functions entirely by gravity without any additional energy. For ICOST, the current cost of each input was calculated with respect to the actual dose used. For ILABOR, a base labor cost of 11.86 € h⁻¹ was used.

For the input variables of API, the number of treatments was based on the presence of Phytoseiid mites. We collected samples every month from October 2008 to July 2009. Each time, the sampling protocol consisted of haphazardly throwing a 30-cm-wide frame onto the ground in the 25 plots (five prototypes, five replicates). Mites were removed from the vegetation using the 'dipping-checking-washing of leaves' method (Mailloux *et al.*, 2010). Phytoseiid mites were then counted under a stereomicroscope (409 magnification), and mounted on slides in Hoyer's medium and identified under a calibrated interference contrast microscope (2009). The ground coverage was estimated visually bimonthly from June 2008 to June 2010 by the surface equivalent of the vertical projection of the aboveground parts of the plants onto the surface of the ground. At the same time, a sample of biomass (3 samplings per elementary plot) was taken by haphazardly throwing a 50-cm-wide frame onto the ground to measure the dry matter produced by each prototype.

The variables concerned by IPHY were plot characteristics and layout, rainfall, the characteristics and the dose of each biocide used (field half-life, GUS (Groundwater ubiquity score), volatility, aquatic toxicity, human toxicity), the type of ground cover at the time of treatment and the characteristics of the equipment used (knapsack sprayer, Solo® 485, France). In total, 29 variables were needed to calculate IPHY.

For the input variables of NPI, five observations were made from January 2008 to January 2010, the day before weeding in 25 plots (five prototypes, five replicates). Staggering our observations enabled us to study the vegetation status and blooming characteristics of all plant species throughout the dry and wet seasons. Plant species were identified on each plot. Species richness, ground cover recovery rate and the proportion of ground cover per plant species were calculated at each observation date. For ground cover recovery rate, the same protocol was used as for API. We performed an indirect evaluation of nectar provisioning in weed management prototypes based on a bio-indicator. Lacewing (Neuroptera: Chrysopidae) was chosen because while larvae are polyphagous predators and feed on several pests of economic importance, most chrysopid adults feed on plant-derived food, such as nectar, pollen or even insect honeydew (Pappas *et al.*, 2011). Nineteen observations were made on the central trees in weed management plots from March 2008 to December 2009. In each plot, the researcher walked around the tree and randomly selected 50 leaves. Both faces of the leaves were examined. As adults fly away as soon as leaves are touched and larvae tend to hide, only eggs were counted. Eggs perched on top of peduncles are typical of Chrysopidae. The trees were also checked for food sources for lacewings. For aphids, we checked all the young branches and recorded their presence on a quantitative scale (0, 10, 50, 100 and more). For mealybugs, we observed four branches (selected at random in directions N, S, W and E) and recorded the presence of the bugs using the same quantitative scale.

Sensitivity test of indicators and statistical analyses

A sensitivity analysis was carried out to test the performance of IPERF, API, GAP-I and NRC (the indicators we developed in our study) with different variations of the input variables. To test the impact of each input variable, we successively varied the other variables by 10%. Each time a variable was varied, we successively set the two untested variables to unfavorable, mean and favorable conditions. Statistical tests were performed with R© software, version 2.8.1. As the variables did not have a normal distribution, a non-parametric ANOVA (Kruskal–Wallis test) and a mean comparison test (Mann–Whitney U test) were used for all the results to determine the differences between the weed management treatments. Relationships between input variables and indicator score were searched for using χ^2 tests ($p < 0.5$).

6.1.3 Results

6.1.3.1 Prototype performance indicators

IPERF (impact of crop management on yield) scores ranged from 3 (PNeo) to 10 (GLY) (table 6.1.5). The annual weed management techniques in prototypes AV, ANeo, and GLY led to higher scores for I-PERF (≥ 7 , $p = 4 \times 10^{-7}$) than the perennial techniques in PV and PNeo. The performance of GLY was explained by its good tree health status (14 out of 15 trees received the top score of 10), and by an average increase in trunk diameter of +180%, approaching the reference values of +200% reported by Davies and Albrigo (1998). These values were much higher than the increase in trunk diameter in the other prototypes: +133% for AV, +128% for ANeo, +110% for PV, and +80% for PNeo. The trees in GLY had significantly higher growth rates than those in AV, ANeo, and PV, all of which had significantly higher growth rates than PNeo (GLY > AV = ANeo = PV > PNeo).

Table 6.1.5: Performance of the 5 weed management prototypes performed in the citrus orchard trial: PV: mowed perennial spontaneous vegetation, GLY: spontaneous vegetation sprayed with glyphosate, AV: mowed annual spontaneous vegetation, ANeo: annual cover crop with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PNeo: perennial cover crop with *N. wightii*. Average values for the indicators I-PERF, API, IPHY, and NPI cover the whole experimentation period (from January 2008 to December 2010) while for the all the other indicators, only one average value ha⁻¹ year⁻¹ is given.

	I-PERF (0 to 10)	TFI (Number of doses)	I- WATER (m ³)	CED (MJ)	I- COST (€)	I- LABOR (h)	API (0 to 10)	IPHY (0 to 10)	NPI (0 to 10)
PV	5.0	3.2	5500	13633	1919	126	4.7	6.8	5.4
GLY	10.0	5.6	4900	7566	1143	60	1.6	6.7	4.3
AV	8.4	3.2	5355	12300	1875	128	4.0	6.8	5.2
ANeo	7.2	4.3	5490	6733	1017	41	8.5	6.3	5.1
PNeo	3.0	1.3	5825	5066	2069	199	8.6	7.0	4.1

Table 6.1.6: Principle variables that contributed to the construction of the indicators API (impact of agricultural practices) and NPI (nectar provisioning indicator). The average value ($\pm$ SE) is given by weed management prototype. PV: mowed perennial spontaneous vegetation, GLY: spontaneous vegetation sprayed with glyphosate, AV: mowed annual spontaneous vegetation, ANeo: annual cover crop with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PNeo: perennial cover crop with *N. wightii*.

Prototype	Density of Phytoseiid mites	Deposition lacewing eggs	Species richness (plant)	Biomass (plant) t ha ⁻¹	% Ground cover
PV (control 1)	1.4 b $\pm$ 1.5	90 a $\pm$ 26	14 a $\pm$ 2	2 b $\pm$ 0.8	85 bc $\pm$ 6
GLY (control 2)	1.5 b $\pm$ 4.5	74a $\pm$ 48	12 ab $\pm$ 3	1.88 b $\pm$ 0.7	60 c $\pm$ 18
AV	1.2 b $\pm$ 2.6	70 a $\pm$ 25	13 a $\pm$ 3	1.87 b $\pm$ 0.5	84 bc $\pm$ 8
ANeo	13.5 a $\pm$ 12.7	68 a $\pm$ 28	10 b $\pm$ 4	3.3 a $\pm$ 1.2	97 a $\pm$ 2
PNeo	13.4 a $\pm$ 9.1	36 b $\pm$ 15	5 c $\pm$ 1	3.6 a $\pm$ 1.1	100 a $\pm$ 0

Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$; Wilcoxon rank-sum test)

The prototypes differed in part by water consumption (IWATER), by the application of supplementary inputs in prototypes other than GLY, and in part by the direct consumption of petrol in prototypes PV and AV, in which weed management was mechanized. For these prototypes, half the total energy costs (CED) were related to petrol consumed directly by mechanization: 7433 MJ ha⁻¹ year⁻¹ for PV and 6133 MJ ha⁻¹ year⁻¹ for AV (or 43 MJ l⁻¹). The other costs were related to indirect energy consumption. For non-mechanized prototypes (GLY, ANeo, and PNeo), energy costs were due to the use of glyphosate at 1096 MJ ha⁻¹ year⁻¹ in AV and 2473 MJ ha⁻¹ year⁻¹ in GLY. In all prototypes, CED (cumulative energy demand) related to fertilizer use was 3602 MJ ha⁻¹ year⁻¹ (of which 70% was linked to N) and 1300 MJ ha⁻¹ year⁻¹ for the transport of inputs.

ILABOR (labor requirements) values were directly linked to the type of maintenance of the plant ground cover. Manual maintenance (PNeo) or mechanized maintenance with the portable brush cutter (AV and PV) required high amounts of labor, between 2 and 4 times more than GLY and ANeo. The higher ICOST (impact of crop management on production costs) values were directly linked to labor costs. This cost represented 68% of ICOST in PNeo compared to 31% in ANeo, which was the least demanding. After labor costs (ICOST – ILABOR), the next highest costs were water use, which reached 50 to 70% depending on the prototype. The cost of petrol also penalized prototypes AV and PV whereas the cost of other inputs (fertilizers and biocides, including herbicides) represented an average of only 250 € ha⁻¹ year⁻¹.

The indicator TFI (treatment frequency index) was highest in prototype GLY, which represented farmers' present practices with 5.6 doses ha⁻¹ year⁻¹. TFI was lower in the four other prototypes, reaching 1.3 in PNeo. As the TFI of 1.3 corresponds to the biocides required to control pests and was the same in all prototypes, the number of herbicide doses was what differentiated the prototypes. Prototype GLY had the highest specific herbicide TFI with 4.23 doses ha⁻¹ year⁻¹. With respect to this value, PNeo enabled 4.2 doses of herbicide to be saved, AV and PV 3.0 doses, while ANeo saved only 1.2 doses.

6.1.3.2 Environmental risk indicators of each prototype

Prototypes PV, GLY, and AV were strongly penalized by the indicator API (impact of agricultural practices) due to the higher number of weed management operations (herbicides or mowing). This number had a direct impact on the bio-indicator (Phytoseiid mites) in that an average of 1.4 mites were found in PV, GLY, and AV, compared to 13.5 in ANeo and PNeo (table 6.1.6), but also on the average ground coverage, which varied from 60% (GLY) to 100% (PNeo), and the quantity of biomass produced, which was two times higher in PNeo than in GLY. From a statistical point of view, PNeo and ANeo enabled the greatest ground cover stability and GLY the least. IPHY (risk of pesticide pollution), whose scores ranged from 6.3 (ANeo) to 7 (PNeo), did not distinguish between the prototypes (table 6.1.5). The biocides used and the doses applied mainly led to risks of pollution of surface water. These risks were mainly explained by the proximity of the river to the plot (located at a distance of only 10 m), increasing the risk by drift as well as by slope (10%), increasing the risk by runoff. For both risks, the pesticide properties had a lower weight than these field variables. In any case, since one treatment was sufficient to significantly decrease the indicator, the number of treatments played a secondary role. The scores of the NPI (nectar provisioning indicator) in PV (5.4), AV (5.2) and ANeo (5.1) were significantly higher than in GLY (4.3) and PNeo (4.1).

Table 6.1.7: Final aggregation of indicators in 3 modules of evaluation on a scale of 0 to 10; GAP-I (good agricultural practices indicator), NRC (natural resource consumption), ICOST (production cost). Only the prototypes for which the IPERF >7 (performance indicator) score were considered. For NRC and ICOST, GLY constitutes the acceptable value (current practice). PV: mowed perennial spontaneous vegetation, GLY: spontaneous vegetation sprayed with glyphosate, AV: mowed annual spontaneous vegetation, ANeo: annual cover crop with *Neonotonia wightii* Wight and Arnott (Fabaceae), PNeo: perennial cover crop with *N. wightii*.

Prototypes	I-PERF > 7		
	GAP-I	NRC	ICOST
	(Score 0 to 10)		
PV (control 1)	-	-	-
GLY (control 2)	3.4 c	7.0 a	7.0 a
AV	4.9 b	6.2 b	3.4 b
ANeo	6.9 a	7.1 a	7.6 a
PNeo	-	-	-

Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$; Wilcoxon rank sum test)

The difference in scores between PNeo and ANeo, which had the same cover plant (*N. wightii*), were explained by weak species richness (number of plant species) measured in the ground cover (5 species in PNeo compared to 10 in ANeo) (table 6.1.6). This behavior was explained by the reactivation of stock seed after the chemical weeding in the weed management technique in ANeo. Concerning GLY, even if this prototype favored high species richness (12), the low ground coverage (60%) linked to the number of crop herbicide treatments explained its low NPI score. The food sources for lacewings (aphids and mealybugs) were not influenced by the prototypes, although the prototype influenced the level of egg deposition by lacewings, PNeo having the lowest level of all prototypes (table 6.1.6).

6.1.3.3 Final assesement

Prototypes PV and PNeo, whose scores were below 7, were not viable cropping systems. ANeo received the highest GAP-I (good agricultural practices indicator) scores (table 6.1.7). For the two other indicators, NRC (natural resource consumption) and ICOST (impact of crop management on production costs), ANeo and GLY were statistically different but obtained higher scores than AV. Considering the results of this multi-criteria evaluation, ANeo was the best alternative to the current practice (GLY).

6.1.3.4 Sensitivity test results

Sensitivity analysis showed that the sigmoid tendency of curves had an effect on the increase in indicators: the more the values of input variables tended to favorable conditions, the higher the indicators. Sensitivity analysis showed that a slight variation (of around 10%) in the input variables (e.g. linked to a wrong observation) had different impacts depending on the indicator and modified the scores by 1.32 points for I-PERF, 1.1 for NRC, 1.0 for API and 0.56 for GAP-I. These variations indicate the degree of precision required for input variables.

6.1.4 Discussion

Many complex tools have been designed to assess cropping practices as systems. These assessment tools combine complementary indicators for the field assessment of practices or for *ex-ante* assessment of simulation models (Bockstaller *et al.*, 2008). Such tools are often sophisticated and the choice of the indicator is rarely explained (Meul *et al.*, 2008; Sadok *et al.*, 2008). One way to limit the problems of understanding by end users is to involve them in the initial stage of indicator development (Cloquell-Ballester *et al.*, 2006). Consequently we based our work on participatory studies during which the objectives of improvement and evaluation of a cropping system were determined (Le Bellec *et al.*, 2011a). From the evaluation criteria determined by these stakeholders, we constructed a set of indicators allowing multi-criteria analysis of the effects of changing practices on the cropping system. Two types of indicators were constructed. The first evaluated the performance of the practice with measured indicators (water consumption, energy consumption, etc.), while the second predicted the environmental impact of the practice (erosion control, agro-ecosystem disturbance, etc.). To provide information on criteria that were difficult to access or were part of complex systems, with the objective of making them easy to understand by stakeholders (Mitchell *et al.*, 1995), we included several evaluation criteria in composite indicators that aggregated several variables.

The method of constructing the indicators we used proved to be sufficiently flexible to enable the cohesive construction of performance or predictive indicators. The fuzzy expert system enabled the aggregation and ranking of different variables to create a readable result in the form of a score from 0 to 10, which can be easily understood by users. At any time, the threshold values of the variables comprising the indicator and the weight given to each variable can be changed according to new scientific knowledge, techniques, or societal demands. At any time, the causes of poor results of an indicator can be pinpointed thanks to its hierarchical structure (Andalecio, 2010). Sensitivity analyses of indicators are therefore crucial, and allow the identification of improvement solutions, which stakeholders can apply to improve indicator scores. The predictive indicators grouped in GAP-I (good agricultural practices indicator) (API impact of agricultural practices, NPI nectar provisioning indicator, and IPHY risk of pesticide pollution) can be true decision-making tools for changing agricultural practices.

Our set of more or less aggregated indicators enabled the broad issues chosen by the stakeholders to be transformed into operational indicators to evaluate the sustainability of a cropping system (Bezlepina *et al.*, 2011). In this article, we showed that changing cropping practices in an agro-system cannot be done without creating auxiliary effects and that only a multi-criteria analysis can evaluate such effects objectively (Soma and Norway, 2010), thus enabling stakeholders to decide to change or to continue their current practice. Our work was based on a step-by-step approach to redesigning cropping systems and according to expert knowledge based on the prototyping method of Vereijken (1997). This comparative study of changing agricultural practices was conducted according to the principles of a systematic approach. It was based on the establishment of a set of decision-making rules capable of resolving previously identified problems and a set of indicators enabling the evaluation of the accomplishment of these objectives (Nolot and Debaecke, 2003). Stakeholders constructed innovative prototypes that were compared to the current practice and to the practice recommended by the reference crop management system. Our multi-criteria analysis revealed the overall poor performance of the recommended practice, based on a mechanized weed management for young orchards. At the same time, our results revealed the technical and economic efficiency of the current weed management practice, based on regular chemical weed control. However, we evaluated the environmental risks of this practice and showed that the practice is not sustainable. Including the current practice as a control of the experiment is essential. The characterization of this control enabled objective comparisons between the performances of the prototypes with respect to references recognized by the stakeholders.

Finally, our analysis allows us to recommend a new weed management technique for young orchards based on annual ground cover management by planting a cover crop. This cropping practice responds to current constraints on weed management techniques in young orchards in Guadeloupe where the difficulty of mechanizing plots and plant health regulations led to a technical roadblock. This practice also favors ecological services such as erosion control and biological pest control, which are essential for the sustainability of the agro-ecosystem. However, it is up to the stakeholders to decide whether they will change or continue their current practice. The indicators in our analysis will help orient their choice, along with consideration of other constraints specific to their individual farms, their environment, or their work organization, which were not evaluated here. This change in study scale will be definitive in the process of cropping system redesign.



1. Une mois après l'implantation du prototype



2. Enherbement installé, début de saison sèche



3. Après une intervention mécanique (saison sèche)



4. Un mois après la fin de la saison sèche



5. Enherbement installé (saison humide)



6. Juste après intervention une mécanique en saison humide

Figure 6.2.1 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'PV'

6.2 Rappel et illustration des principales performances des cinq prototypes de gestion de l'enherbement au terme des trois ans



PV : débroussaillage et herbicide sous la frondaison toute l'année. Photo 11/2010.

ARBRE

Croissance moyenne des arbres ($\emptyset$) : + 110%

Etat de santé moyen (note 0 à 10) : 6.4

ENHERBEMENT

Taux de couverture moyen : 85 %

Biomasse moyenne : 2 t ha⁻¹

Richesse spécifique moyenne : 14

Composition végétale moyenne (présence moyenne supérieure à 10 %) :



Tridax procumbens (19 %)



Vernonia cinerea (16 %)



Dicanthium annulatum (12 %)

	I-PERF (0 à 10)	TFI (Nombre de doses)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)	API (0 à 10)	IPHY (0 à 10)	NPI (0 à 10)
PV	5.0	3.2	5500	13633	1919	126	4.7	6.8	5.4

IPERF : indicateur de performance (santé et croissance de l'arbre)

TFI : Indice de fréquence de traitement

IWATER : Eau consommée

CED : Dépenses énergétiques directes et indirectes

ICOST : Coût de production

ILABOR : Quantité de main d'œuvre nécessaire

API : Indicateur de perturbation de l'agrosystème

IPHY : Indicateur de risque lié aux pesticides

NPI : Indicateur d'intérêt pour la lutte par conservation (provision en nectar)



1. Implantation du prototype



2. Deux mois après



3. Enherbement après désherbage chimique total (Glyphosate)



4. Trois mois après une opération de désherbage chimique (saison sèche)



5. Enherbement après désherbage chimique total (Glyphosate)



6. Trois mois après une opération de désherbage (saison humide)

Figure 6.2.2 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'GLY'





GLY : Herbicide sur la surface totale toute l'année
(en moyenne tous les 4 mois) - photo 11/2010.

ARBRE

Croissance moyenne des arbres ($\emptyset$) : +180 %

Etat de santé moyen (note 0 à 10) : 10

ENHERBEMENT

Taux de couverture moyen : 60 %

Biomasse moyenne : 1.88 t ha⁻¹

Richesse spécifique moyenne : 12

Composition végétale moyenne (présence moyenne supérieure à 10 %) :



Echinochloa colona (21 %)



Eleusine indica (10 %)

	I-PERF (0 à 10)	TFI (Nombre de doses)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)	API (0 à 10)	IPHY (0 à 10)	NPI (0 à 10)
GLY	10.0	5.6	4900	7566	1143	60	1.6	6.7	4.3

IPERF : indicateur de performance (santé et croissance de l'arbre)

TFI : Indice de fréquence de traitement

IWATER : Eau consommée

CED : Dépenses énergétiques directes et indirectes

ICOST : Coût de production

ILABOR : Quantité de main d'œuvre nécessaire

API : Indicateur de perturbation de l'agrosystème

IPHY : Indicateur de risque lié aux pesticides

NPI : Indicateur d'intérêt pour la lutte par conservation (provision en nectar)



1. Implantation du prototype



2. un mois après, l'enherbement s'implante progressivement



3. Enherbement naturel juste avant une intervention mécanique (saison sèche)



4. Saison sèche (compétition pour l'eau avérée entre les arbres et l'enherbement), décision est prise de supprimer l'enherbement par l'application d'un herbicide total



5. Deux mois après, redémarrage de l'enherbement naturel



6. Enherbement naturel implanté, décision est prise de le faucher mécaniquement (saison humide)

Figure 6.2.3 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'AV'



AV : 1/ débroussaillage et herbicide (pourtour de l'arbre) toute l'année et 2/ herbicide sur la totalité une fois par an- Photo 11/2010.

ARBRE

Croissance moyenne des arbres (Ø) : +133 %

Etat de santé moyen (note 0 à 10) : 9.3

ENHERBEMENT

Taux de couverture moyen : 84 %

Biomasse moyenne : 1.87 t ha⁻¹

Richesse spécifique moyenne : 13

Composition végétale moyenne (présence moyenne supérieure à 10 %) :



Tridax procumbens (25 %)



Vernonia cinerea (18 %)



Echinochloa colona (11 %)

	I-PERF (0 à 10)	TFI (Nombre de doses)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)	API (0 à 10)	IPHY (0 à 10)	NPI (0 à 10)
AV	8.4	3.2	5355	12300	1875	128	4.0	6.8	5.2

IPERF : indicateur de performance (santé et croissance de l'arbre)

TFI : Indice de fréquence de traitement

IWATER : Eau consommée

CED : Dépenses énergétiques directes et indirectes

ICOST : Coût de production

ILABOR : Quantité de main d'œuvre nécessaire

API : Indicateur de perturbation de l'agrosystème

IPHY : Indicateur de risque lié aux pesticides

NPI : Indicateur d'intérêt pour la lutte par conservation (provision en nectar)



1. Implantation du prototype : semis de *N. wightii*



2. une mois après, les poacées ont pris le dessus, décision prise d'appliquer un herbicide sélectif contre les poacées



3. Un mois après l'herbicide sélectif, *N. wightii* s'implante



4. *N. wightii* implanté



5. Saison sèche (compétition pour l'eau avérée entre les arbres et l'enherbement), décision est prise de supprimer *N. wightii* avec un herbicide total (Glyphosate) pour limiter les compétitions



6. Deux mois après redémarrage de *N. wightii*. Le glyphosate n'a pas tué *N. wightii* mais a permis de diminuer les compétitions à une période critique

Figure 6.2.4 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'ANeo'



ANeo : 1/ herbicide (pourtour de l'arbre) toute l'année et 2/ herbicide sur la totalité une fois par an - photo 11/2010.

ARBRE

Croissance moyenne des arbres (Ø) : +128 %

Etat de santé moyen (note 0 à 10) : 8

ENHERBEMENT

Taux de couverture moyen : 97 %

Biomasse moyenne : 3.3 t ha⁻¹

Richesse spécifique moyenne : 10

Composition végétale moyenne (présence moyenne supérieure à 10 %) :



Neonotonia wightii (79 %)

	I-PERF (0 à 10)	TFI (Nombre de doses)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)	API (0 à 10)	IPHY (0 à 10)	NPI (0 à 10)
ANeo	7.2	4.3	5490	6733	1017	41	8.5	6.3	5.1

IPERF : indicateur de performance (santé et croissance de l'arbre)

TFI : Indice de fréquence de traitement

IWATER : Eau consommée

CED : Dépenses énergétiques directes et indirectes

ICOST : Coût de production

ILABOR : Quantité de main d'œuvre nécessaire

API : Indicateur de perturbation de l'agrosystème

IPHY : Indicateur de risque lié aux pesticides

NPI : Indicateur d'intérêt pour la lutte par conservation (provision en nectar)



1. Implantation du prototype : semis de *N. wightii*



2. Un mois après les poacées ont pris le dessus



3. Fauchage manuel des poacées pour favoriser *N. wightii*



4. *N. wightii* s'implante progressivement



5. *N. wightii* est implanté. Comportement en saison sèche



6. *N. wightii* est implanté. Comportement en saison humide

Figure 6.2.5 : Principales phases d'installation et de gestion du prototype 'PNeo'



PNeo : enherbement géré manuellement toute l'année – photo 11/2010.

ARBRE

Croissance moyenne des arbres (Ø) : +80 %

Etat de santé moyen (note 0 à 10) : 5.7

ENHERBEMENT

Taux de couverture moyen : 100 %

Biomasse moyenne : 3.6 t ha⁻¹

Richesse spécifique moyenne : 5

Composition végétale moyenne (présence moyenne supérieure à 10 %) :



Neonotonia wightii (86 %)

	I-PERF (0 à 10)	TFI (Nombre de doses)	I-WATER (m ³)	CED (MJ)	I-COST (€)	I-LABOR (h)	API (0 à 10)	IPHY (0 à 10)	NPI (0 à 10)
PNeo	3.0	1.3	5825	5066	2069	199	8.6	7.0	4.1

IPERF : indicateur de performance (santé et croissance de l'arbre)

TFI : Indice de fréquence de traitement

IWATER : Eau consommée

CED : Dépenses énergétiques directes et indirectes

ICOST : Coût de production

ILABOR : Quantité de main d'œuvre nécessaire

API : Indicateur de perturbation de l'agrosystème

IPHY : Indicateur de risque lié aux pesticides

NPI : Indicateur d'intérêt pour la lutte par conservation (provision en nectar)

Rapport-Gratuit.com

DISCUSSION GÉNÉRALE

«L'innovation n'est pas, pour l'agriculteur, un objectif en soi : n'en est-ce pas un, parfois, pour son concepteur ? » (Sebillotte, 1974). Dans sa synthèse bibliographique sur les « *Méthodes de conception de systèmes de production innovants* », Novak (2008) conclut en ces termes : « Ces outils (de conception) semblent généralement trop complexes pour être utilisés directement par des conseillers agricoles ou par des agriculteurs. (...) Il manquerait donc un lien entre le travail des chercheurs, aboutissant à la mise au point d'un outil ou d'une méthode d'aide à la conception et leur utilisation par leurs cibles (agriculteurs, conseillers, voire politiques) ». Et Keating & Mc Cown (2001) d'abonder que le challenge dans les 10 années à venir n'était pas de mettre au point des modèles plus précis ou plus complets, mais de trouver de nouvelles façons d'être utiles aux agriculteurs pour leur prise de décision et pour leurs pratiques de conduite. La méthode DISCS s'est fixée ces objectifs pour aboutir à la co-reconception de systèmes de culture durables ; nous réalisons dans cette discussion un retour sur notre démarche de reconception en recherchant les atouts, les limites et les perspectives de la méthode.

1. Surpasser les conflits d'intérêts par un dialogue entre acteurs à chaque étape de la re-conception

La méthode DISCS a été élaborée comme une proposition de réponse au défi de l'innovation en agriculture, dans une dynamique de développement durable. Le postulat de base est que, à un temps et dans un territoire donnés, et quel que soit l'observateur, les systèmes de production agricole ne donnent pas entièrement satisfaction. En effet, tout observateur du système de production agricole en question trouvera à signaler un défaut de fonctionnement et/ou à suggérer une piste d'amélioration. Un acteur, qu'il soit personnellement intéressé aux performances d'un système de production agricole, ou qu'il représente un intérêt collectif (par exemple la qualité des eaux de surface du territoire, ou l'approvisionnement d'un marché local), analysera les insuffisances du système en question à l'aune de ses propres objectifs de performance, et, dans une dynamique de développement, pourra proposer des solutions.

L'agriculture progresse ainsi par ré-ajustements successifs, à l'initiative de différents acteurs identifiant un défaut de la performance recherchée dans les systèmes de production agricole. Lorsque les acteurs extérieurs à l'exploitation agricole font alors valoir leurs intérêts, souvent divergents entre eux et de ceux des agriculteurs, l'exécuteur de ces ajustements, le producteur, se retrouve vite au centre d'un conflit d'intérêt qui risque de paralyser son activité jusqu'à la faire périr.

Le concept de « développement durable » se traduit dans le domaine de l'agriculture en un mode de gestion concertée des ressources naturelles et humaines, de façon à rechercher une réponse commune à l'ensemble des intérêts des acteurs concernés.

Partant du principe que chaque acteur a à la fois des objectifs à formuler, des contraintes à opposer et des solutions ou des orientations à proposer, la méthode DISCS est conçue comme une proposition de cadre méthodologique facilitant la concertation entre tous ces acteurs, la confrontation de leurs intérêts respectifs et la recherche d'une solution plus satisfaisante. Nous avons fait l'hypothèse qu'en tenant compte des intérêts de chaque type d'acteurs, à chaque étape du processus d'évolution des systèmes de production agricole, ceux-ci ne s'engageront pas dans des impasses de développement en se heurtant à des contraintes imposées par l'un ou l'autre des acteurs.

Appliquer au système de culture agrumicole, la méthode DISCS a permis de créer et de formaliser une dynamique qui ne pourra, à terme, que favoriser les adoptions des systèmes de culture innovants (Reed, 2008 ; Wei *et al.*, 2009). Par exemple, depuis la réalisation du premier diagnostic (2006), plusieurs formations à l'utilisation raisonnée des produits phytosanitaires et à destination des producteurs ont eu lieu. Dans le même temps, les producteurs impliqués dans ce projet ont été familiarisés à l'utilisation des indicateurs d'évaluation (notamment des impacts environnementaux de leurs pratiques) et les chercheurs leur ont présenté les nouvelles combinaisons techniques venant appuyer les producteurs dans leurs efforts pour diminuer leur niveau d'utilisation d'herbicide. Or cette dynamique, déjà établie entre les producteurs impliqués dans le projet DéPhi, a fourni l'opportunité au même groupe de travail de se mobiliser autour de la question de la reconnaissance de la qualité de leur production : comment caractériser leurs fruits ? Quels critères de qualité se fixer, dans l'optique d'une future labellisation ? De sorte qu'une des perspectives de poursuite de la dynamique du projet repose sur une problématique de qualité (sensorielle, écologique), de la qualité de la production, à l'initiative des producteurs.

Si les interactions producteurs/techniciens/chercheurs (groupe nommé 'professional stakeholders' dans notre démarche) ont jalonné les différentes étapes de la méthode DISCS, les interactions avec les autres acteurs (les représentants de la société, groupe nommé 'public stakeholders' dans notre démarche), ont été également importantes. La mixité de ce dernier groupe d'acteurs s'est aussi avérée primordiale. En effet, force a été de constater que certains acteurs avaient une connaissance limitée du système de culture agrumicole jusqu'à avoir des suspicions quant aux pratiques phytosanitaires en cours, ceci étant probablement lié au climat de défiance consécutif à la crise de la chloredécone (Belpomme, 2007). Dans notre démarche, les acteurs sociaux portent les intérêts de la société dont chacun des membres se trouve être un porte-parole de l'entité qu'il représente mais aussi un consommateur. Chacun de ces acteurs défend logiquement ses intérêts, mais, dans un tel collectif, aucun d'entre eux n'est prioritaire. C'est donc l'ensemble du collectif qui, par un jeu de négociations, aboutit à des solutions qui doivent être partagées par tous. Il est donc primordial de garantir la mixité de ce collectif afin d'éviter des décisions trop centrées sur le domaine de compétence d'acteurs particuliers (Busca, 2004). Compte tenu de la question posée aux acteurs - déterminer des critères d'évaluation d'un système de culture - somme toute assez simple, nous n'avons pas du faire appel à des techniques d'animation de réunion particulières. Notre méthode pourrait cependant mobiliser des méthodologies plus participatives encore, en fonction de la question posée, du moment et du degré d'implication des acteurs (Girard, 2006 ; Etienne *et al.*, 2008 ; Tangay, 2010), avec cependant le risque d'allongement du processus de reconception et une demande accrue de mobilisation des acteurs pas toujours facile à obtenir.

2. Trois familles d'acteurs, trois référentiels

L'objet choisi comme cible des actions pour la méthode DISCS est la parcelle cultivée, en tant que plus petite unité cible de la prise de décision des agriculteurs. La reconception concerne les systèmes de culture, au sens de «*l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique*» (Sebillotte, 1974). Un système de culture est dit 'innovant' lorsqu'il intègre une technique, ou une combinaison de techniques, nouvelle, tout en étant effectivement mis en pratique sur le territoire concerné, par une partie au moins des exploitants agricoles. Le système de culture est la cible d'intérêt de trois familles d'acteurs : les producteurs, qui sont ceux qui mettent en œuvre le système de culture, les représentants des acteurs de la filière et du milieu (écologique et socioéconomique), qui sont concernés par les effets de la pratique du système de culture sur les ressources humaines et écologiques, et sur les qualités de la production agricole obtenue, enfin les scientifiques, qui sont ceux à qui on fait appel pour créer des solutions techniques en réponse à des objectifs ou à des contraintes. Distinguer ces trois familles d'acteurs conduit à identifier trois référentiels d'analyse pour le système de culture : i) l'exploitation agricole, au sein de laquelle le système de culture est intégré à un système de production, ii) le territoire, sur lequel le système de culture représente la plus petite unité de fonctionnement et iii) la station expérimentale, dans laquelle le système de culture est envisagé comme un objet de recherche isolé de son contexte (ou au moins d'une dimension de son contexte, écologique ou humaine). La mise au point de la méthode DISCS n'est ni de nier ces trois référentiels, ni d'essayer de les fondre en un seul référentiel intégrateur, mais d'organiser l'amélioration du système de culture dans les trois référentiels en parallèle, en forçant des concertations répétées entre les acteurs.

L'enjeu de la méthodologie DISCS est de favoriser la génération de solutions techniques locales (applicables directement sur la parcelle) à des questions globales (les objectifs sont fixés à l'échelle territoriale). La mobilisation des acteurs intervenant aux trois échelles d'action (exploitation, station et territoire) a été organisée autour de groupes de travail collectifs, et d'outils traduisant spécifiquement à chaque échelle les objectifs fixés à l'échelle territoriale. Les grilles d'évaluation correspondant aux trois échelles d'étude doivent donc être construites pour répondre aux mêmes objectifs, mais les indicateurs diffèrent en fonction des spécificités de chaque échelle, et de l'utilisateur. En ce sens, la méthode DISCS ne vise pas à tout prix une généricité de construction des indicateurs d'évaluation même si au final, dans notre cas d'étude, les objectifs recherchés de durabilité du système de culture ont conduit les acteurs à la détermination de critères d'évaluation (et à leur transformation en indicateurs appropriés) empreints d'une certaine généricité.

3. Faciliter les échanges d'information en adoptant une démarche d'amélioration continue

La méthode DISCS se distingue des méthodes classiques de prototypage (dans la lignée de Vereijken, 1997) en ceci qu'elle ne suppose pas la transmission d'un prototype de système de culture innovant mis au point en station expérimentale vers la profession agricole, mais recourt à un processus d'amélioration continue des systèmes de culture.

Nous nous inspirons pour cela de la « *boucle du management environnemental* » formalisée par Meynard *et al.* (2002), que nous appliquons séparément dans les trois référentiels. Une première boucle a donc pour objet l'amélioration continue des prototypes à proposer aux producteurs, une deuxième boucle a pour objet l'amélioration continue d'un itinéraire technique sur chaque exploitation, tandis que la troisième boucle aborde la problématique de l'amélioration continue des systèmes de culture à l'échelle du territoire. La structure d'une telle boucle, que nous appelons de manière générique 'boucle de progrès', quelle que soit son échelle d'application, repose toujours sur les quatre mêmes étapes : diagnostic et plan d'action, mise en œuvre des actions, évaluation des résultats obtenus, enfin formulation de nouveaux objectifs pour l'élaboration d'un nouveau plan d'action (« plan, do, check, act », Meynard *et al.*, 2002).

Faire fonctionner ces trois boucles de progrès en parallèle dans les trois référentiels a pour objectif d'intégrer au fur et à mesure les résultats obtenus dans un référentiel donné aux travaux conduits dans les deux autres référentiels. De nouvelles informations peuvent de cette manière être entrées à chaque nouvelle itération, facilitant les échanges entre les trois référentiels. Les évaluations périodiques des résultats obtenus dans le cadre d'une boucle de progrès sont à la fois l'occasion de faire le bilan des travaux conduits dans le référentiel concerné, et celle d'intégrer les changements survenus dans le cadre du fonctionnement des deux autres boucles de progrès. La méthode DISCS est ainsi conçue comme l'imbrication de trois boucles de progrès, ayant chacune pour objet d'étude (et cible d'action) le système de culture, mais en positionnant celui-ci dans trois référentiels distincts : l'exploitation, le territoire et la station expérimentale.

La méthode DISCS permet de reconcevoir le système de culture pas-à-pas et chemin faisant grâce à une implication forte des acteurs. Cette reconception relève d'un long processus avec le risque de produire un changement 'x' pour un temps 't' alors que d'autres objectifs apparaissent durant le processus ! L'implication des acteurs est alors primordiale pour déterminer les objectifs prioritaires de reconception mais aussi pour favoriser les allers/retours et les changements d'échelle souhaités par la méthode, cette 'co-reconception' limite dès lors le risque de produire un changement qui ne serait plus voulu au bout du compte.

4. Matérialiser les supports d'échange entre acteurs par trois objets de transfert, produits des boucles de progrès

Les interfaces entre les trois boucles sont matérialisées par un objet, à la fois résultat (donc sortie) d'une boucle, et matériel (donc entrée) d'une autre boucle. Ainsi, le système de culture innovant, cible d'action pour l'ensemble des acteurs, est l'objet de sortie de la boucle exploitation, en tant qu'innovation en réponse à une problématique de développement durable. Mais dans ce processus continu d'amélioration, ce nouveau système de culture est également objet d'entrée dans la boucle territoire. Cette seconde boucle retourne en sortie une problématique, formalisant les objectifs et les contraintes pour l'amélioration des systèmes de culture en place. Cette problématique est transmise comme objet d'entrée pour la boucle station, laquelle retourne enfin un ensemble de pratiques potentiellement innovantes, à leur tour objet d'entrée pour la boucle exploitation.

5. Répartir les rôles des acteurs entre deux niveaux d'intervention

Le processus d'innovation est donc réparti entre deux boucles de progrès, celles fonctionnant dans les référentiels 'station expérimentale' et 'exploitation agricole'. Ce rapprochement est étendu aux deux familles d'acteurs correspondantes : les producteurs, le technicien du développement et les scientifiques peuvent en effet être rassemblés en acteurs 'techniques', par opposition aux acteurs 'sociaux', qui interviennent par des consultations, voire par l'imposition de règles, mais sans être impliqués directement dans les opérations techniques réalisées sur les systèmes de culture. L'implication des différents acteurs dans le cadre de la méthode DISCS est donc réalisée à deux niveaux : un niveau technique, regroupant les acteurs agissant sur le système de culture, et un niveau social, réunissant les acteurs intéressés à formuler des recommandations pour harmoniser le développement du système de culture avec les autres secteurs d'activité du territoire. La méthode DISCS nécessite donc pour son application que soient constitués deux types de groupes de travail. Le premier groupe, réunissant les représentants des acteurs sociaux, sera amené à se prononcer sur les objectifs de durabilité à fixer aux systèmes de culture en cours de développement. Le second groupe de travail intervient pour la partie technique de conception et d'évaluation des systèmes de culture. De cette manière, tandis que la répartition des tâches s'effectue traditionnellement entre recherche en station pour les scientifiques, mise en pratique en exploitation par les producteurs, et transmission des résultats de la recherche vers la profession agricole par les techniciens¹, dans le cadre de la méthode DISCS les trois catégories d'acteurs interagissent entre elles : le résultat de leur concertation alimente et repositionne les boucles de progrès.

6. Favoriser des innovations appropriables

DISCS s'inscrit dans la lignée de la méthodologie du prototypage de Vereijken (1997) en permettant de produire des systèmes de culture innovants pertinents et appropriables, d'une part parce que « *le prototype est un objet interdisciplinaire qui confère un caractère finalisé aux travaux disciplinaires et d'autre part parce qu'il permet d'impliquer les partenaires dès les premières phases de la construction* (Lançon & Reau, 2008) ». Cependant, les innovations créées par cette démarche participative ont pu être naturellement bridées par la composition du collectif, des acteurs 'techniques' qui ont probablement recherché avant tout la faisabilité de l'innovation. C'est effectivement un risque mais c'est aussi un atout car les producteurs, pragmatiques et ayant la connaissance de leur milieu, recherchent des solutions réalistes. Le rôle de tous les acteurs du collectif est alors primordial, car tous, ensemble, contribuent activement à la démarche de co-construction, en apportant leur connaissance du sujet et des idées d'innovation (Darré, 2006 ; Oliver *et al.*, 2010). Dans notre cas d'application, une solution proposée au collectif a porté sur l'utilisation des plantes de couverture en verger. Cette proposition a été permise parce des travaux prospectifs avaient été réalisés sur la zone d'étude. Il s'agit probablement là d'un autre préalable à notre méthode : la présence d'une équipe de recherche et développement au plus près des réalités des producteurs. Cependant, le recours à la modélisation comme outil d'aide à la conception des prototypes pourrait s'avérer pertinent.

¹ Schéma 'top-down' : 'les chercheurs innovent, les agriculteurs appliquent'.

Rapport-Gratuit.com

Ces outils pourraient avantageusement être intégrés dans notre méthode DISCS principalement dans une phase prospective (Rossing *et al.*, 1997) de conception de prototypes et/ou de leur évaluation *ex ante* (Sadok *et al.*, 2009). Les innovations seraient alors proposées aux acteurs et la reconception du système pourrait démarrer par la phase d'expérimentation car de toute évidence les innovations doivent être testées et validées ensuite sur le terrain (Rossing *et al.*, 1997). Cependant, un choix des meilleures innovations devra être opéré car notre méthode participative ne permet pas de tester un nombre important de prototypes simultanément compte tenu de sa lourdeur de mise en œuvre. Nous n'avons pas pu mobiliser cette compétence de modélisateur lors de notre cas d'application mais cela nécessiterait de l'être à l'avenir notamment pour le développement d'outils d'aide à la décision par des couplages du modèle de culture à des modèles d'évaluation *ex ante* et/ou de décision (Blazy, 2008 ; Tixier *et al.*, 2008).

7. Permettre à chaque acteur d'évaluer ses résultats par rapport à la problématique commune, grâce à trois grilles d'évaluation multicritère

De façon à faciliter les échanges entre les différentes catégories d'acteurs, la méthode DISCS prévoit enfin de doter chaque boucle de progrès d'une grille d'évaluation, validée par l'ensemble des acteurs, de sorte que les résultats de l'évaluation conduite dans le cadre d'un référentiel donné reflètent les intérêts de l'ensemble des acteurs concernés, autant qu'il est possible dans le référentiel en question. Il n'est ni possible, ni souhaitable, de fournir trois grilles d'évaluation génériques avec la méthode DISCS. En effet, dans le cadre de la boucle station, les critères évalués dépendent fortement de la nature des techniques mises à l'essai : c'est par conséquent aux scientifiques de décider des indicateurs de performance pertinents en accord avec les objectifs et les contraintes formulés par les autres acteurs. Dans le cas de la grille d'évaluation destinée à être utilisée dans le cadre de la boucle exploitation, l'évaluation a pour objectif l'aide à la décision, et elle est réalisée par le producteur lui-même. Les résultats affichés par l'évaluation indiquent au producteur les pratiques à améliorer sur sa parcelle. La grille d'évaluation consiste donc en un outil d'aide à la décision, reposant sur des règles de décisions par nature fortement dépendantes du contexte particulier, des pratiques et du système de culture étudiés. La conception de l'outil d'évaluation n'est pas aboutie tant que les producteurs ne se sont pas effectivement approprié l'outil. Nous avons fait l'hypothèse que le plus sûr moyen de concevoir un outil adapté à l'utilisation par les producteurs est d'impliquer les utilisateurs finaux (Cloquell-Ballester, 2006) dans le processus de construction des indicateurs. La forme recommandée pour cette grille d'évaluation à destination des producteurs est celle d'un jeu d'indicateurs donnant une note comprise entre 0 et 10, facilement lisible par les différents acteurs et selon la proposition de Bockstaller *et al.* (1997).

Enfin, la grille d'évaluation utilisée dans la boucle territoire est définie au cours des réunions multi-acteur et de la réalisation du diagnostic. Comme pour les deux autres référentiels, l'appréciation des résultats observés en sortie de la boucle territoire n'est possible qu'à condition que la même grille d'évaluation soit utilisée en entrée et en sortie de boucle. Néanmoins, au cours de ce processus d'amélioration continue, l'évaluation n'est pertinente que si elle s'adapte aux évolutions du contexte, des objectifs et des contraintes : les grilles d'évaluation sont donc soumises, comme la problématique, les prototypes et les systèmes de culture, à une remise en question par les acteurs, à chaque tour de boucle.

CONCLUSION

Le premier objectif de cette thèse a été atteint. Il s'agissait de créer une dynamique pour activer un processus d'innovation en vue d'engager les systèmes de culture agrumicoles guadeloupéens vers plus de durabilité. Un diagnostic agronomique a permis ensuite d'identifier la principale contrainte de ces systèmes de culture (la gestion de l'enherbement) et ses déterminants (la difficulté de mécanisation liée aux caractéristiques des parcelles : fortes pentes et empierrement). La pratique de gestion de l'enherbement actuelle des producteurs, basée sur l'utilisation régulière d'herbicides sur la totalité de la parcelle, présente des risques pour l'utilisateur¹ mais aussi pour l'environnement². En accord avec les différents acteurs socio-professionnels impliqués dans la dynamique, la gestion de l'enherbement comme objectif prioritaire de reconception du système de culture agrumicole a donc été décidée. Les critères d'évaluation de cet objectif d'amélioration ont également été co-décidés, ce qui a répondu au second objectif de ce travail de thèse.

Pour répondre à ces objectifs d'amélioration du système de culture, des innovations ont été collectivement proposées. En réponse, cinq prototypes de gestion de l'enherbement ont été testés en station expérimentale selon les principes d'une approche systémique. Au terme de trois années d'étude, une grille d'analyse multicritère composée d'indicateurs et construite sur la base des critères d'évaluation décidés avec les acteurs a permis de comparer les performances de ces cinq modes de gestion de l'enherbement des jeunes vergers d'agrumes en Guadeloupe. Cette analyse a montré les mauvaises performances globales de la pratique de gestion de l'enherbement actuellement préconisée par l'itinéraire technique de référence et basée sur une gestion mécanisée de l'enherbement spontané. Parallèlement, nos résultats ont montré l'efficacité technique et économique de la pratique de gestion de l'enherbement actuellement en cours en Guadeloupe, basée sur une gestion chimique et régulière de l'ensemble de l'enherbement. Par contre, nos résultats ont également pointé les risques qu'elle fait encourir à l'environnement qui font d'elle une pratique peu durable et donc à proscrire. Les troisième et quatrième objectifs de ce travail ont ainsi permis d'évaluer les effets directs ou indirects, positifs ou négatifs induits par le changement d'une pratique d'un système de culture.

Notre travail nous permet aujourd'hui de préconiser une nouvelle tactique de gestion de l'enherbement des jeunes vergers basée sur une gestion annuelle de la couverture du sol via l'implantation d'une légumineuse. Cette pratique culturale permet de répondre aux contraintes actuelles de la gestion de l'enherbement des vergers guadeloupéens dont les difficultés de mécanisation des parcelles et la réglementation phytosanitaire en cours avaient conduit les producteurs dans une impasse technique. Cette pratique permet aussi d'offrir des services écologiques (lutte contre l'érosion, contribution à la lutte biologique par conservation...) indispensables à la durabilité de l'agrosystème et apporte en ce sens une réponse aux objectifs de réduction de l'utilisation des pesticides du plan national Ecophyto 2018. Il convient désormais de valider les effets de cette innovation lors des changements d'échelle (exploitation et territoire) comme cela est souhaité par notre méthodologie de reconception des systèmes de culture.

¹ Les pénibles conditions de travail liées à la chaleur font que peu de producteurs (ou leurs salariés) utilisent une protection individuelle pour se protéger lors de l'application des traitements phytosanitaires.

² En Guadeloupe, plus de 40 % des masses d'eau continentale sont de mauvaise qualité chimique, le glyphosate est mis en cause (De roffignac *et al.*, 2008).

RÉFÉRENCES CITÉES

- Akobundu I.O., Ekeleme F., Chikoye D., 1999. Influence of fallow management systems and frequency of cropping on weed growth and crop yield. *Weed Research* **39**, 241-256.
- Anderson R.L., 2005. A multi-Tactic Approach to Manage Weed Population Dynamics in Crop Rotations. *Agronomy Journal* **97**, 1579-1593.
- Ait Haddou Mouloud M., Bousrhal A., Benyahia H., Benazzoouz A., 2002. Effet du stress salin sur l'accumulation de la proline et des sucres solubles dans les feuilles de trois porte-greffes d'agrumes au Maroc. *Fruits* **57**, 335-340.
- Altieri M.A., 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **93**, 1-24.
- Andalecio M.N., 2010. Multi-criteria decision models for management of tropical coastal fisheries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 557-580.
- Anderson R.L., 2005. A multi-Tactic Approach to Manage Weed Population Dynamics in Crop Rotations. *Agronomy Journal* **97**:1579-1593.
- Aubert B., 2009. Nouvelle menace sur les agrumes de Méditerranée, Le huanglongbing (HLB) en 16 questions. *Fruitrop* **168**, 2-7.
- Bezlepkina I., Reidsma P., Sieber S., Helming K., 2011. Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: Methods, tools and applications. *Agricultural Systems* **104**, 105-109.
- Bakry F., Didier C., Ganry J., Le Bellec F., Lescot T., Pinon A., Rey J.Y., Teisson C., Vannière H., 2002. Agriculture spéciale. Les plantes comestibles : les espèces fruitières. In *Mémento de l'agronome*, CIRAD, GRET, Ministère des Affaires Etrangères, Montpellier, France, 929-1021.
- Barbar, Z., Tixier, M.S., Kreiter, S., Cheval, B., 2005. Diversity of phytoseiid mites in uncultivated areas adjacent to vineyards: a case study in the south of France. *Acarologia* **45**, 145-154.
- Barberi P., Burgio G., Dinelli G., Moonen A.C., Otto S., Vazanna C., Zanin G., 2010. Functional biodiversity in the agricultural landscape: relationships between weeds and arthropod fauna. *Weed Research* **50**, 388-401.
- Barber R.G. and Navarro F., 1994. Evaluation of the characteristics of 14 cover crops used in a soil rehabilitation trial. *Land Degradation Development* **5**, 201-214.
- Beaugendre J., 2005, *Le chlordécone aux Antilles et les risques liés à l'utilisation des produits phytosanitaires. Quel bilan du passé? Quelles leçons pour l'avenir ?* Assemblée Nationale n°2430, 167 p.
- Beaulieu F., Weeks A.R., 2007. Free-living mesostigmatic mites in Australia: their roles in biological control and bioindication. *Aust J Exp Agr* **47**, 460-478.

- Beauvois C., 2006. Elaboration d'une typologie des exploitations en production d'agrumes de Guadeloupe et étude des pratiques culturales, Univ. Paris 1 Panthéon-Sorbonne, mém. Master 2, Paris, France, 69 p.
- Béguin P., 2003. Design as a mutual learning process between users and designers. *Interacting with computers* **15**, 709-730.
- Begum M., Gurr G.M., Wratten S.D., Nicol H.I., 2004. Flower colors affects tri-trophic-level biocontrol interactions. *Biological control* **30**, 584-590.
- Bellon S., Bockstaller C., Fauriel J., Geniaux G., Lamine C., 2007. To design or to redesign: how can indicators contribute? In *Farming System Design 2007*, Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems. Catania (Italy), pp. 137-138.
- Belpomme D., (coord.), 2007. *Rapport d'expertise et d'audit externe concernant la pollution par les pesticides en Martinique. Conséquences agrobiologiques, alimentaires et sanitaires et proposition d'un plan de sauvegarde en cinq points*. Association pour la Recherche Thérapeutique Anti-Cancéreuse, 54 p.
- Benyahia H., Ait Haddou Mouloud M., Jrfi A., Lamsettef Y., 2004. Effet de la salinité de l'eau d'irrigation sur la colonisation des racines des porte-greffes d'agrumes par *Phytophthora parasitica*. *Fruits* **59**, 101-108.
- Bertrand M., Doré T., 2008. Comment intégrer la maîtrise de la flore adventice dans le cadre général d'un système de production intégrée ? *Innovations Agronomiques* **3**, 1-13.
- Bianchi F.J.J.A., Wäckers F.L., 2008. Effects of flower attractiveness and nectar availability in field margins on biological control by parasitoids. *Biological Control* **46**, 400-408.
- Biarnes A., Rio Patrick and Hocheux A., 2004. Analysing the determinants of spatial distribution of weed control practices in a Languedoc vineyard catchment. *Agronomie* **24**, 187-196.
- Blazy, J.-M. 2008. Evaluation ex ante de systèmes de culture innovants par modélisation agronomique et économique : de la conception à l'adoption. Cas des systèmes de culture bananiers de Guadeloupe. Thèse de doctorat. SupAgro, Montpellier. 190p.
- Blinda M., Thivet G., 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspective, *Sécheresse* **20**, 9-16.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy* **7**, 261-270.
- Bockstaller C., Girardin P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agricultural systems* **76**, 639-653.
- 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.
- Boller E.F., 1984. Eine einfache Ausschwemm-Methode zur schnellen Erfassung von Raubmilben, Thrips und anderen Kleinarthropoden im Weinbau. *Schweiz Zeitschrift für Obst-Weinbau* **120**, 249-255.

- Bond W., Grundy A.C., 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research* **41**:383-405.
- Bonin, M., Cattan P., Dorel M., Malezieux E., 2006. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux. Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. In Agronomes et Innovations, Caneill J. (dir.), Paris, édition L'Harmattan, p. 123-135.
- Borroto Perez M., Perez Carmenate R., Borroto Perez A., Cubillas N., Cepero R.M., 2001. Impact on soil of herbaceous legumes as an improvement of natural cover in citrus plantations. *Ensaio-e-Ciencia* **5**, 93-116.
- Browning H.W., 1999. Arthropod pests of fruit and foliage. In: Timmer LW, Duncan LW (eds) Citrus health management. University of Florida, Citrus Research and Education Center, Lake Alfred, US, 116-123.
- Busca, D., 2004, Agriculture et environnement. La mise en oeuvre négociée des dispositifs agri-environnementaux. Effets d'organisation, enjeux de territoire et dynamique d'appropriation stratégique », *Ruralia* **12**, 1-10. <http://ruralia.revues.org/348>
- Carberry P., Gladwin C., Twomlow S., 2004. Linking simulation modelling to participatory research in smallholder farming systems, in: Delve R.J, Probert M.E (2004) (Eds) Modelling nutrient management in tropical cropping systems, Australian Centre for International Agricultural Research, AICR Proceedings 114, pp. 32-46.
- Carvalho J.E.B., Lopes L.C., Araujo A.M., Souza L., Caldas R.C., 2003. Integrated control of weeds of pawpaw and their effect on the physical properties of soils of the coastal plateau. *Comunicado Técnico Embrapa Mandioca e Fruticultura* **83**, 4.
- Caron P., 2005. À quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Natures Sciences Sociétés* **13**, 145-153.
- Ceballo F.A., Walter G.H., 2005. Why is *Coccidoxenoides perminutus*, a mealybug parasitoid, ineffective as a biocontrol agent - Inaccurate measures of parasitism or low adult survival? *Biological Control* **33**, 260-268.
- Cerf M., Meynard J., 2006. Les outils de pilotage des cultures: diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés* **14**, 19-29.
- Chant D.A., Mc Murtry J.A., 2007. *Illustrated keys and diagnoses for the genera and subgenera of the Phytoseiidae of the world (Acari: Mesostigmata)*. Indira Publishing House, West Bloomfield, 220 p.
- Charpentier H., Doumbia S., Coulibaly Z., Zana O., 1999. L'aménagement des unités de paysage dans le nord de la Côte d'Ivoire. *Agriculture et développement* **21**, 41-70.
- Chen X., Yang Y.S., Tang J.J., 2004. Species-diversified plant cover enhances orchard ecosystem resistance to climatic stress and soil erosion in subtropical hillside. *Journal of Zhejiang University Science* **5**, 1191-1198.
- Childers C.C., Rogers M.E., McCoy C.W., Nigg H.N., Stansly P.A., 2007. *Florida citrus pest management guide: rust mites, spider mites and other phytophagous mites*. University of Florida IFAS extension.

- Chittka L., Raine N.E., 2006. Recognition of flowers by pollinators. *Current opinion in plant biology* **9**, 428-431.
- Cloquell-Ballester V.A., Monterde-Diaz R., Santamarina-Siurana M.C., 2005. Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **26**, 79-105.
- Collier K.F.S., de Lima J.O.G., Albuquerque G.S., 2004. Predacious mites in Papaya (*Carica papaya* L.) orchards: in search of a biological control agent of phytophagous mite pests. *Neotrop Entomol* **33**, 799-803.
- Couteux A., Lejeune V., 2008. Index phytosanitaire, ACTA Ed., Paris, France, 406 p.
- Cortesero A.M., Stapel J.O., Lewis W.J., 2000. Understanding and manipulating plant attributes to enhance biological control. *Biological Control* **17**, 35-49.
- Damas O., Le Bellec F., Solvar F., Tournebize R., Ozier-Lafontaine H., 2007. Les plantes de couverture en verger. In *La production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. Intégration de la biodiversité dans les systèmes de culture*, Le Bellec F.(ed), Cirad, Vieux-Habitants, 08 novembre 2007, 1 p.
- Da Silva J.A.A., Vitti G.C., Stuchi E.S., Sempionato O.R., 2002. Recycling and incorporation of nutrients to the soil in orchard of 'pera' orange by cultivation with cover crops. *Rev. Bras. Frutic, Jaboticabal* **24**, 225-230.
- Daskalopoulou I., Petrou A., 2002. Utilising a farm typology to identify potential adopters of alternative farming activities in Greek agriculture. *J. Rural Stud.* **18**, 95-103.
- Davies F., Albrigo L., 1998. *Citrus*. CAB International, Wallingford, UK, 254 p.
- Darré J.P., 2006. *La recherche coactive de solutions entre agents de développement et agriculteurs*. Gret-Librairie, Paris, France, 112 p.
- De Bello F., Lavorel S., Diaz S., Harrington R., Cornelissen J.H.C., Bardgett R.D. *et al.*, 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity Conservation* **19**, 2873-2893.
- De Roffignac L., Ramassamy M., Le Bellec F., Le Bellec V., 2006. Mise en place des principes de la production fruitière intégrée chez les producteurs. In *La production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. Intégration de la biodiversité dans les systèmes de culture*, Le Bellec F. (ed), Cirad, Vieux-Habitants (Guadeloupe), 9 Novembre 2006, 1 p.
- De Roffignac L., 2008. *Manuel Technique – Cultures fruitières en Guadeloupe*. Editions ASSOFWI, Guadeloupe, France, 54 p.
- De Roffignac L., Cattani P., Mailloux J., Herzog D., Le Bellec F. 2008. Efficiency of a bagasse substrate in a biological bed system for the degradation of glyphosate, malathion and lambda-cyhalothrin under tropical climate conditions. *Pest management science* **64**, 1303-1313.
- Deutsch B., Paulian M., Thierry D., Canard M., 2005. Quantifying biodiversity in ecosystems with green lacewing assemblages. *Agronomy for Sustainable Development* **25**, 337-343.
- Dulcire M., Piraux M., Chia E., 2006. « Stratégie des acteurs face à la multifonctionnalité : le cas de la guadeloupe et de la réunion. *Cahiers Agricultures* **15**, 363-370.

- Duran Zuazo V.H., Rodriguez Pleguezuelo C.R., 2008. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable development* **28**, 65-86.
- Duso C., Fontana P., Malagnini V., 2004. Diversity and abundance of phytoseiids mites (Acari: Phytoseiidae) in vineyards and the surrounding vegetation in northeastern Italy. *Acarologia* **44**, 31-47.
- Etienne J., Leblanc F., Fournier P., 1998. *Fiches techniques d'identification et d'initiation à la protection raisonnée des vergers d'agrumes en Guadeloupe*. Cirad, Inra Editions, Guadeloupe, France, 34 p.
- Etienne J., 1999. *Contrôle biologique de la cochenille de l'hibiscus en Guadeloupe*. INRA Editions, Paris, 8 p.
- Etienne M., du Toit D., Pollard S., 2008. ARDI: a co-construction method for participatory modelling in natural resources management. In *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*, Sánchez-Marré M., Béjar J., Comas J., Rizzoli A., Guariso G. (Eds.).
- Etienne M., 2008. Co-construction d'un modèle d'accompagnement selon la méthode ARDI : guide méthodologique. Ecole Chercheurs « évaluation multicritères des systèmes d'élevage et de cultures », INRA, Joué-lès-Tours, 20-23 mai 2008.
- Fadamiro H.Y., Xiao Y., Nesbitt M., Childers C.C., 2009. Diversity and seasonal abundance of predacious mites in Alabama Satsuma Citrus. *Ann Entomol Soc Am* **102**, 617-628.
- Faegri K., van der Pijl L., 1979. *The principal of pollination ecology*. Oxford, Pergamon Press, New York, USA.
- Feld C.K., da Silva M., Sousa J.P., de Bello F., Bugter R., Grandin U. *et al.*, 2009. Indicators of biodiversity and ecosystems services: a synthesis across ecosystems and spatial scales. *Oikos* **118**, 1862-1871.
- Firth D., 1995. Groundcovers in Macadamia orchards. The sixth Conference of the Australian Council on Tree and Nut Crops Inc.; 11-15 september 1995; 8p. <http://www.newcrops.uq.edu.au/acotanc/papers/firth.htm>
- Fischer B.B., Jordan L.S., 1991. Weeds. In *Integrated Pest Management for Citrus*. M.L. Flint Editor, University of California, USA, 132-142.
- Flint M.L., 1991. *Integrated pest management for Citrus*- second edition, Division of Agriculture and Natural Resources, University of California, California, USA, 144 p.
- Fournet J., 2002. *Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique*. CIRAD et Gondwana Edition, France.
- Frischknecht R., Jungbluth N., *et al.*, 2003. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI, Duebendorf: Switzerland.
- Gagliano, F., Gristina, L., Novara, A. et Santoro, A. 2008. Ground cover vegetation in the vineyard reduces the risk of erosion. *Informatore Agrario Supplemento* **64**, 10-13.
- Gerowitt B., 2003. Development and control of weeds in arable farming systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **98**, 247-254.

- Gerson U., 1992. Biology and control of the broad mite, *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae). *Experimental applied acarology* **13**, 163-178.
- Gibson C.M., Hunter M.S., 2005. Reconsideration of the role of yeasts associated with *Chrysoperla* green lacewings. *Biological Control* **32**, 57-64.
- Gliessman S.R., 2006. Agroecology - the ecology of sustainable food systems, CRC Press.
- Godefroy J., 1988. Observations de l'enracinement du stylosanthes, de la crotalaire et du flémingia dans un sol volcanique du Cameroun. *Fruits* **43**, 79-86.
- Goldhammer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. Et M. Cohen, 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **124**, 437-444.
- Goldhamer, A.A., Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* **20**, 115-125.
- Grafton-Cardwell E.E., Ouyang Y., Bugg R.L., 1999. Leguminous cover crops to enhance population development of *Euseius tularensis* (Acari : Phytoseiidae) in Citrus. *Biological Control* **16**, 73-80.
- Graux E., Le Bellec F., De Roffignac L., 2009. Séminaire agroécologie tropicale- Introduction. In *Séminaire Agroécologie*, 18 novembre 2009, Bouillante, Guadeloupe, 3 p.
- Gravena S., Coletti A., Yamamoto P.T., 1993. Influence of green cover with *Ageratum conyzoides* and *Eupatorium pauciflorum* on predatory and phytophagous mites in citrus. *Bull IOBC-SROP* **16**, 104-114.
- Grisoni M., 1993. La culture des agrumes à l'île de la Réunion, CIRAD Editions, Montpellier, France, 103 p.
- Grout T.G., 1994. The distribution and abundance of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) on citrus in southern Africa and their possible value as predators of citrus thrips (Thysanoptera: Thripidae). *Experimental applied acarology* **18**, 61-71.
- Grundy A.C., Mead A., Bond W., Clark G., Burston S., 2010. The impact of herbicide management on long-term changes in the diversity and species composition of weed populations. *Weed Research*, online first : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3180.2010.00831.x/abstract>
- Girard N., 2006. Catégoriser les pratiques d'agriculteurs pour reformuler un problème en partenariat. Une proposition méthodologique. *Cahier Agriculture* **15**, 261-272.
- Girardin P., Guichard L., Bockstaller C., 2005. Indicateurs et tableaux de bord : guide pratique pour l'évaluation environnementale, Ed. Tec&Doc, Lavoisier, Paris.
- Giupponi C., 1998. Environmental evaluation of alternative cropping systems with impact indices of pollution. *European journal of Agronomy* **8**, 71-82.
- Gutierrez I.R., Borroto M., Perez G., Gomez L., 2002. Effect of *Neonotonia wightii* cover on changes in the flora of Valencia Late orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) plantations. *Cultivos Tropicales* **23**, 5-9.

- Hanley M.E., Camont B.B., Faubants M.M., Rafferty C.M., 2007. Plant structural traits and their role in anti-herbivory defence. *Perspective in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **8**, 157-178.
- Haverkort, A.J., Jansen, D.M., de Ruijter, F.J., Verhagen, A. 2008. From food safety guidelines to quantified sustainability indicators: A transition to good practice schemes in food production in Europe. *Outlook on Agriculture* **37**, 37-45.
- Hingston A.B., Mc Quillan P.B., 2000. Are pollination syndromes useful predictors of floral visitors in Tasmania? *Austral Ecology* **25**, 600-609.
- Hill S.B., 2006. Enabling redesign for deep industrial ecology and personal values transformation: a social ecology perspective, in: Green K., Randles S. (Eds.), *Industrial ecology and spaces of innovation*. Edward Elgar Publishing, pp. 255-271.
- Hislop R.I., Prokopy R.J., 1981. Integrated management of phytophagous mites in Massachusetts (USA) apple orchards. 2. Influence of pesticides on the predator *Amblyseius fallacis* (Acarina: Phytoseiidae) under laboratory and field conditions. *Prot Ecol* **3**, 157-172.
- Houdart M., Bonin M., Temple L., 2009. Dynamique d'acteurs (agriculteurs et institutions) et innovation agro-écologique pour la gestion des risques environnementaux en Guadeloupe. *VertigO* **9**, 1-7.
- Huang M., Mai X., Wu W., 1978. Studies on the integrated control of the citrus red mite with the predacious mite as a principal controlling agent. *Acta Entomologica Sinica* **21**, 260-270.
- Imbert E., 2009. Les agrumes. *Fruitrop* **172**, 15-50.
- Imbert E., 2010 a. Les agrumes d'été. *Fruitrop* **179**, 27-58.
- Imbert E., 2010 b. Les agrumes. *Fruitrop* **183**, 23-58.
- InVS-Inserm, 2010. Impact sanitaire de l'utilisation du chlordécone aux Antilles françaises – Recommandations pour les recherches et les actions de santé publique – Octobre 2009, Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, France, 96 p. Disponible sur: http://www.invs.sante.fr/publications/2010/chlordecone_antilles_francaises/_rapport_chlordecone_antilles_francaises.pdf
- Isaacs R., Tuell J.K., Fiedler A.K., Gardiner M.M., Landis D.A., 2009. Maximizing arthropod-mediated ecosystem services in agricultural landscapes: the role of native plants. *Frontiers in Ecology and the Environment* **7**, 196-203.
- Jackson L.K., 1990. Citrus growing in Florida. University of Florida press, USA, 293 p.
- Jakku E., Thorburn P.J., 2010. A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems* **103**, 9:675-682.
- Jannoyer M., Lavigne C., Le Bellec F., Malézieux E., 2009. Using cover crops to enhance ecological services in orchards : a multiple criteria and systemic approach applied to tropical areas, In *Gaïé. EECA 2009 Ecological Engineering : from Concepts to Applications International Congress*, 2-4 December 2009, Paris, France.
- Jiang XiaoJun, 2003. Experiment of growing forage grass in persimmon orchard. *South China Fruits* **32**, 47-48.

- Karban R., English-Loeb G., Walker M.A., Thaler J., 1995. Abundance of phytoseiid mites on Vitis species: effects of leaf hairs, domatia, prey abundance and plant phylogeny. *Experimental applied acarology* **19**, 189–197.
- Keating B.A., McCown R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems* **70**, 555–579.
- Khan Z.R., James D.G., Midega C., Pickett J.A., 2008. Chemical ecology and conservation biological control. *Biological Control*, **45**, 210–224.
- King C., Gunton J., Freebairn D., Coutts J., Webb I., 2000. The sustainability indicator industry: where to from here? A focus group study to explore the potential of farmer participation in the development of indicators. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **40**, 631–642.
- Knowler D., Bradshaw B., 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy* **32**, 25–48.
- Krebs J.R., Wilson J.D., Bradbury R.B., Siriwardena G.M., 1999. The second Silent Spring? *Nature* **400**, 611–612.
- Kong C., Hu F., Xu X., Zhang H., Liang W., 2005. Volatile allelochemicals in the Ageratum conyzoides intercropped citrus orchard and their effects on mites Amblyseius newami and Panonychus citri. *Journal of Chemical Ecology* **31**, 2193–2203.
- Kongchuensin M., Charanasri V., Takafuji A., 2005. Geographic distribution of Neoseiulus longispinosus (Evans) and its habitat plants in Thailand. *J Acarol Soc Jpn* **14**, 1–11.
- Kostrowicki J., 1977. Agricultural typology concept and method. *Agricultural Systems* **2**, 33–45.
- Kreiter S., Le Menn V., 1993. Interactions entre le désherbage chimique de la vigne et les populations d'acariens phytophages et prédateurs. In: Résultats de laboratoire. AFPP, Troisième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture, Montpellier, 7–9 December 1993, pp 821–830.
- Kreiter S., Tixier M.S., Auger P., Strafile D., Barret D., 1999. Importance de la pilosité et des domaties des feuilles des plantes sur les Phytoseiidae (Acari). In: AFPP, Cinquième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture, Montpellier, 7–8–9 Décembre 1999, pp 699–712.
- Kreiter S., Tixier M.S., Croft B.A., Auger P., Barret D., 2002. Plants and leaf characteristics influencing the predaceous mite, Kampimodromus aberrans, in habitats surrounding vineyards. *Environ Entomol* **31**, 648–660.
- Kreiter S., Tixier M.S., Barbar Z., 2005. Quelle sorte de prédateurs les Phytoseiidae sont-ils réellement ? Les différentes catégories fonctionnelles de prédateurs et celles utiles en agriculture en France (Acari). In: AFPP, Deuxième Colloque International sur les Acariens des Cultures, Montpellier 24–25 Octobre 2005, 11 pp.
- Kreiter S., Tixier M.S., Etienne J., 2006. New records of phytoseiid mites (Acari: Mesostigmata) from the French Antilles, with description of Neoseiulus ceciliae sp. nov. *Zootaxa* **1294**, 1–27.

- Lançon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Géraudeau E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* **27**, 101-110.
- Landais E., 1998. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Le Courrier de l'environnement* **33**, 5-22.
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* **45**, 175-201.
- Lapointe S.L., 2003. Leguminous cover crops and their interactions with Citrus and Diaprepes abbreviatus (Coleoptera: Curculionidae). *Florida Entomologist* **84**, 80-85.
- Lapointe S.L., Mc Kenzie C.L., Hunter W.B., 2003. Toxicity and Repellency of Tephrosia candida to Larval and Adult Diaprepes Root Weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Economic Entomology* **96**, 811-816.
- Lavigne C., Pancarte C., Bertin Y., Ducelie D., Jannoyer M., 2007. Constraints and feasibility of organic Tahiti lime in Martinique, In Fruticultura, II Simposio Internacional de Fruticultura Tropical y Subtropical, 17-21 Septiembre, La Habana, Cuba, 1p.
- Le Bellec V., Le Bellec F., 2004. *Fruits des Antilles*. PLB Editions, France, 128 p.
- Le Bellec F., Herzog D., Fournier P., Mauléon H., Renard-Le Bellec V., Ramassamy M., 2005. The integrated fruits production in Guadeloupe. In *Alternatives to high input agriculture in the Caribbean*, 41st Annual Meeting of the Caribbean Food Crops Society, Guadeloupe, France, 1 p.
- Le Bellec F., 2006. La production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. In *Intégration de la biodiversité dans les systèmes de culture, Journée sur la Production Fruitière Intégrée en Guadeloupe*, Le Bellec F. (ed), CIRAD, 2006-11-09, Vieux-Habitants, Guadeloupe, 10 p.
- Le Bellec F., Bonin M., Beauvois C., Renard-Le Bellec V., Tournebize R., Briand S., Denon D., Mauléon H., Petit J.M., 2006. Les producteurs d'agrumes en Guadeloupe et leurs pratiques. L'offre de formation aux producteurs en adéquation. In *La production fruitière intégrée en Guadeloupe*, Le Bellec F. (ed), CIRAD, Guadeloupe, France, 1 p.
- Le Bellec F., 2007. La production fruitière intégrée en verger en Guadeloupe. In *Intégration de la biodiversité dans les systèmes de culture, Journée sur la Production Fruitière Intégrée en Guadeloupe*, Le Bellec F. (ed), CIRAD, 2007-11-08, Vieux-Habitants, Guadeloupe, 9 p.
- Le Bellec F., Le Bellec V., 2007. *Le verger Tropical – cultiver les arbres fruitiers*, Orphie Editions, Paris, France, pp. 7-79.
- Le Bellec F., Le Bellec V., 2008. *Le jardin créole : produire en respectant l'environnement*. Orphie Editions, Paris, France, 44 p.
- Le Bellec F., Malezieux E., Bockstaller C., Ozier Lafontaine H., Lesueur-Jannoyer M., 2009a. A participatory method to design innovative sustainable cropping systems for citrus production at the field scale in the French West Indies. In *Farming System Design*, 23-26 August 2009, Monterey, 2 pp.

- Le Bellec F., Tournebize R., Petit J.M., 2009b. Les pratiques respectueuses de l'environnement, gestion de l'enherbement des vergers par des plantes de couvertures : un exemple en l'agrumiculture guadeloupéenne. *Les Antilles Agricoles* **17**, 32-33.
- Le Bellec F., Mauléon H., 2010 a. Lutte biologique : utilisation des nématodes entomopathogènes contre les jakos. *Les Antilles Agricole* **21**, 20-21.
- Le Bellec F., Damas O., Tournebize R., Vannière H., Ozier Lafontaine H., Jannoyer M., 2010 b. How to manage weeds with a reduced used of herbicides: Cover crops in Mandarin Orchard in Guadeloupe. In *28th International Horticultural Congress*, August 22-27, 2010, Lisboa, Portugal.
- Le Bellec F., Mailloux J., Dubois P., Rajaud A., Kreiter S., Bockstaller C., Tixier M.S., Malézieux E., 2010 c. Phytoseiid mites (Acari) are bio-indicators of agricultural practice impact on the agroecosystem functioning : the case of weed management in citrus orchards. In *Proceedings of Agro 2010: the XIth ESA Congress*, Wery J., Shili-Touzi I., Perrin A. (eds.), August 29th - September 3rd, 2010, Montpellier, France.
- Le Bellec F., Cattani P., Bonin M., Rajaud A., 2011. Building a typology of cropping practices from comparison to a common reference: first step for a relevant cropping system re-designing process – Results for tropical citrus production. *Fruits* **66**, 143-159.
- Liang W.G., Huang M.D., 1994. Influence of citrus orchard ground cover plants on arthropod communities in China: a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **50**, 29-37.
- Liebman M., Davis A.S., 2000. Intergration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research* **40**:27-47.
- Lien G., Kumbhakar S.C., Hardaker J.B., 2010. Determinants of off-farm work and its effects on farm performance: the case of Norwegian grain farmers. *Agric. Econ.* **41**, 577-786.
- Louchart, X., Voltz, M., Andrieux, P. et Moussa, R. 2001. Herbicides runoff at field and watershed scales in a Mediterranean vineyard area. *Journal of environmental quality* **30**, 982-991.
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In *L'Agronomie aujourd'hui*, Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J. (Eds), Quae, Versailles, France, pp. 77-98.
- Machado I.C., Lopes A.V., 2004. Floral traits and pollination systems in the Caatinga, a Brazilian Tropical Dry Forest. *Annual of botany* **94**, 365-376.
- Macchia E.T., Mc Sorley R., Duncan L.W., Syvertsen J.S., 2003. Effects of perennial peanut (*Arachis glabrata*) ground cover on nematode communities in citrus. *Journal of Nematology* **35**, 450-457.
- Mailloux J., Le Bellec F., Kreiter S., Tixier M.S., Dubois P., 2010. Influence of ground cover treatment on diversity and density of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) in Guadeloupean citrus orchards. *Experimental applied acarology* **52**, 275-290.
- Makrodimos N., Blionis G.J., Krigas N., Vokou D., 2008. Flower morphology, phenology and visitor patterns in an alpine community on Mt Olympos, Greece. *Flora* **203**, 449-468.

- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **29**, 43-62.
- Marnotte P., 1984. Influence des facteurs agroécologiques sur le développement des mauvaises herbes en climat tropical humide. In 7ème coll. *Int. Ecol. Biol. et Syst. Des mauvaises herbes*, COLUMA-EWRS, Paris, 183-189.
- Marttunen M., Suomalainen M., 2005. Participatory and multiobjective development of water course regulation - creation of regulation alternatives from stakeholders' preferences. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* **13**, 29-49.
- Mas M.T., Poggio S.L., Verdu A.M.C., 2007. Weed community structure of mandarin orchards under conventional and integrated management in northern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **119**, 305-310.
- Mathais H.A., Filho R.V., 2005. Cover crops and natural vegetation mulch effect achieved by mechanical management with lateral rotary mower in weed population dynamics in citrus. *Journal of Environmental Science and Health B* **40**, 185-190.
- Matheis H.A.S.M., Victoria Filho R., 2005. Cover crops and natural vegetation mulch effect achieved by mechanical management with lateral rotary mower in weed population dynamics in citrus. *Journal of Environmental Science and Health* **40**, 185-190.
- McMurtry J.A., 1982. The use of phytoseiids for biological control: progress and future prospects. In *Recent advances in knowledge of the Phytoseiidae*, Hoy MA (ed), University of California, Division of Agricultural Sciences, Berkeley, pp 23-28.
- McMurtry J.A., Croft B.A., 1997. Life-styles of Phytoseiid mites and their roles in biological control. *Annual Review of Entomology* **42**, 291-321.
- 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.
- Meynard J., Doré T., Habib R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable, *Acad. Agric. Fr.* **87**, 223-236.
- Meynard J.-M., Cerf M., Guichard L., Jeuffroy M.-H., Makowski D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* **22**, 817-829.
- Meynard J.M., Aggeri F., Coulon J.B., Habib R., Tillon J.P., 2006. *Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants*, INRA (Eds.), pp. 57.
- Meynard J.M., 2008. Produire autrement : Réinventer les systèmes de culture. In *Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Réau R., Doré T. (Eds), Educagri, France, Dijon, pp. 11-28.
- Mischler P., Hocdé H., Triomphe B., Omon B., 2008. Conception de système de culture avec des agriculteurs : partager les connaissances et les compétences pour innover. In *Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Réau R., Doré T. (Eds), Educagri, France, Dijon, pp. 72.

- Mitchell G., May A., McDonald A., 1995. PICABUE: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* **2**, 104–123.
- Moonen A.C., Barberi P., 2008. Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystem & Environment* **127**, 7-21.
- Multigner L., Ndong J.R., Giusti A., Romana M., Delacroix-Maillard H., Cordier S., Jégou B., Thome J.P., Blanchet P., 2010. Chlordecone Exposure and Risk of Prostate Cancer. *Journal of Clinical Oncology* **28**, 3457-3462.
- Muma M.H., 1961. The influence of cover crop cultivation on populations of indigenous insects and mites in Florida citrus groves. *Florida Entomologist* **44**, 61–68.
- Navarrete M., Tchamitchian M., Etienne M., Lécivain E., Lasseur J., Napoléone M., 2007. Combining scientific and lay knowledge in model to accompany actors in a changing agriculture. In *International symposium on methodologies on integrated analysis on Farm Production Systems*, Italy, Catania, 10-12 sept 07.
- Nogueira-Couto R.H., Pereira J.M.S., De Jong D., 1998. Pollination of *Glycine wightii*, a perennial soybean, by Africanized honey bees. *Journal of Apicultural Research* **3**, 289-291.
- Nolot J., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture, *Cahier Agriculture* **12**, 387–400.
- Nordstrom E.M., Eriksson L.O., Ohman K., 2010. Integrating multiple criteria decision analysis in participatory forest planning: Experience from a case study in northern Sweden. *Forest Policy and Economics* **12**, 562-574.
- Novak S., 2008. *Méthode de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole, synthèse bibliographique*. Solphy Expertise, UMR Innovation Montpellier (SupAgro, Inra, Cirad), 64 p.
- Novotny V., 1999. Diffuse pollution from agriculture, a worldwide outlook. *Water Science Technology* **39**, 1-13.
- Nyrop J.P., Minns J.C., Herring C.P., 1994. Influence of ground cover on dynamics of *Amblyseius fallacis* Garman (Acarina: Phytoseiidae) in New York apple orchards. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **50**, 61–72.
- Oliver Y.M., Robertson M.J., Wong M.T.F., 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *European Journal of Agronomy* **32**, 40–50.
- Olson D.M., Wäckers F.L., 2007. Management of field margins to maximize multiple ecological services. *Journal of applied ecology* **44**, 13-21.
- Ortuno M.F., Garcia-Orellana Y., Conejero W., Perez-Sarmiento F., Torrecillas A., 2008. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management* **96**, 80–86.
- Pappas M.L., Broufas G.D., Koveos D.S., 2011. Chrysopid Predators and their Role in Biological Control. *Journal of Entomology* **8**, 301-326.

- Papy F., Baudry J., 2002. Le système de culture : différents niveaux d'organisation territoriale à distinguer et articuler. In *Entretiens du Pradel, Les Journées Olivier de Serres*, 2ème édition, 12-13 septembre 2002.
- Papy F., 2004. Commentaire: Avec les agriculteurs, comprendre les problèmes, chercher des solutions. *Natures Sciences Sociétés* **12**, 4:400-401.
- Phillis Y. A., Andriantiatsaholinaina L. A., 2001. Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics* **37**, 435-456.
- Pitman M. and Läuchli A., 2004. Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In *Salinity: Environment - Plants - Molecules*, A. Läuchli and U. Lüttge (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 3-20.
- Plaisir J., Démonio W., Claudin J., 2003. *Atlas du Parc National de Guadeloupe*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Montpellier, France, 68 p.
- Ramos M., Rodriguez N., 1997. Acaros fitoseidos Phytoseiidae en el cultivo de la papa: descripción de una nueva especie. *Revista de Protección Vegetal* **12**, 109-112.
- Rapey H., Lifran R., Valadier A., 2001. Identifying social, economic and technical determinants of silvopastoral practices in temperate uplands: results of a survey in the Massif Central region of France. *Agricultural Systems* **69**, 119-135.
- Réau R. et Doré T., 2008. *Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri Editions, France, 175 p.
- Reed M.S., 2008. Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological conservation* **141**, 2417-2431.
- Rodriguez N., Ramos M., 2004. Biology and feeding behaviour of *Amblyseius largoensis* (Muma) (Acari: Phytoseiidae) on *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae). *Revista de Protección Vegetal* **19**, 73-79.
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). In *Bulletin pédagogique de la FAO* 70, Available at : <http://www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f00.htm#Contents>
- Rossing W.A.H., Meynard J.M., van Ittersum M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* **7**, 271-283.
- Rossing W.A.H., Zander P., Josien E., Groot J.C.J., Meyer B.C., Knierim A., 2007. Integrative modelling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: A review for France, Germany and The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **120**, 41-57.
- Ripoche A., 2009. *Modélisation de systèmes de culture adaptatifs: conception de stratégies flexibles d'enherbement en parcelle viticoles*. Thèse, SupAgro, Montpellier, 120 p.
- Ripoche A., Celette F., Cinna J.P., Gary C., 2010. Design of intercrop management plans to fulfil production and environmental objectives in vineyards. *European Journal of Agronomy* **32**, 30-39.

- Quilici S., Vincenot D., Franck A., 2003. *Les auxiliaires des cultures fruitières*. CIRAD Editions, Paris, France, 168 p.
- 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.
- Sastre C., Breuil A., 2007. *Plantes, milieux et paysages des Antilles françaises – Ecologie, biologie, identification, protection et usages*. Biotope Editions, France, 672 p.
- Sebillotte M., 1974. Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome, *Cahiers de l'ORSTOM, sér. Biol.* **24**, 3-25
- Schneider M.I., Sanchez N., Pineda S., Chi H., Ronco A., 2009. Impact of glyphosate on the development, fertility and demography of *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae): ecological approach. *Chemosphere* **76**, 1451-1455.
- Sillon J.F., Ozier-Lafontaine H., Brisson N., 2000. Modelling daily root interactions for water in a tropical shrub and grass alley cropping system. *Agroforestry Systems* **49**, 131-152.
- Simpson E.H., 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**, 688.
- Simmoneaux V., Lepage M., Helson D., Metral J., Thomas S., Duchemin B., Cherkaoui M., Kharrou H., Berjani B., Chehbouni A., 2009. Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection : application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). *Sécheresse* **20**, 123-130.
- Simon S., Bouvier J.C., Debras J.F., Sauphanor B., 2010. Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 139-152.
- Soma K., Norway A., 2010 Framing Participation with Multicriterion Evaluations to Support the Management of Complex Environmental Issues. *Environmental Policy and Governance* **20**, 89-106.
- Stein A., Riley J., Halberg N., 2001. Issues of scale for environmental indicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **87**, 215-232.
- Sugeno M., 1985. An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences* **36**, 59-83.
- Tangay N., 2010. Réflexion sur l'utilisation de groupes de discussion comme outil de documentation du savoir écologique traditionnel. *VertigO* **3**, 1-7.
- Teasdale J.R., Mangum R.W., Radhakrishnan J., Cavigelli M.A., 2004. Weed Seedbank Dynamics in Three Organic Farming Crop Rotations. *Agronomy Journal* **96**, 1429-1435.
- Temple, L., P. Marie et F. Bakry, 2005, Analyse de la compétitivité et de l'impact économique des filières de production de bananes en Martinique et en Guadeloupe. Rapport Final. Ministère de l'agriculture de l'Alimentation de la Pêche et des Affaires rurales, Cirad Montpellier, 98 p.
- Tixier M.S., Kreiter S., Auger P., Weber M., 1998. Colonization of Languedoc vineyards by phytoseiid mites influence of wind and crop environment. *Experimental applied acarology* **22**, 523-542.

- Tixier M.S., Kreiter S., Cheval B., Guichou S., Auger P., Bonafos R., 2006. Immigration of phytoseiid mites from surrounding uncultivated areas into a newly planted vineyard. *Experimental applied acarology* **39**, 227–242.
- Tixier P., Malézieux 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.
- Tixier, P., Malezieux, E., Dorel, M. et Wery, J. 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural Systems* **97**, 139–150.
- Toyoshima S., Ihara F., Amano H., 2008. Diversity and abundance of phytoseiid mites in natural vegetation in the vicinity of apple orchards in Japan. *Applied Entomology and Zoology* **43**, 443–450.
- Tuovinen T., Rokx J.A.H., 1991. Phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) on apple trees and in surrounding vegetation in southern Finland. Densities and species composition. *Experimental applied acarology* **12**, 35–46.
- Urbino C., Le Bellec F., Fournier P., Bruyère S., Ramassamy M., Chidiac A., Deroche J., Monnerville G., 2004. La maladie de la tristezza des agrumes est en Guadeloupe : la production de plants de qualité s'impose. *Phytoma - La défense des végétaux* **573**, 26–27.
- Valbuena D., Verburg P.H., Bregt A.K., 2008. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**, 27–36.
- van der Werf H.M.G., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* **36**, 2225–2249.
- Vannière H., 2009. La culture des agrumes. *Fruitrop* **172**, 45–49.
- Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* **7**, 235–250.
- Wackers F.L., 2004. Assessing the suitability of flowering herbs as parasitoids food sources: flower attractiveness and nectar accessibility. *Biological Control* **29**, 307–314.
- Wackers F.L., van Rijn P.C.J., Bruin J., 2005. *Plant-provided food for carnivorous insects: A protective mutualism and its applications*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wei Y.P., Chen D., White R.E., Willett I.R., Edis R., Langford J., 2009. Farmers' perception of environmental degradation and their adoption of improved management practices in Alxa, China. *Land Degraation and Development* **20**, 336–346.
- Winkler K., Wackers F.L., Kaufman L.V., Larraz V., van Lenteren J.C., 2009. Nectar exploitation by herbivores and their parasitoids is a function of flower species and relative humidity. *Biological control* **50**, 299–306.
- Wright G.C., Mc Closkey W.B., Taylor K.C., 2003. Managing orchard floor vegetation in flood irrigated citrus groves. *HortTechnology* **13**, 668–677.

- Yang Y., Wang H., Tang J., Chen X., 2007. Effects of weed management practices on orchard soil biological and fertility properties in southeastern China. *Soil & Tillage Research* **93**, 179-185.
- Zacharda M., 2001. Predatory phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) as bioindicators of stress impact on a farmland and buttresses of the farmal revival. *Ekologia* **20**, 47-56.
- Zadoks J. C., 1993. Crop Protection : Why and How. In *Crop Protection and Sustainable Agriculture*, Chadwick D. J. and J. Marsh (eds), J. Wiley & Sons, New York, 48-55.

Rapport-Gratuit.com

Annexe 1 : Sélection et description des plantes de services, détail des résultats de la section 4.2.2 pour la Guadeloupe.

Un premier criblage exhaustif des plantes de services potentielles répertoriées dans la flore de Guadeloupe et de Martinique (Fournet, 2002) sur les critères : hauteur < 50cm, ports et développements autres qu'érigé, plantes d'écologie humide écartées a permis de dénombrier 202 espèces. Il s'agit du premier filtre de la méthode de sélection, à ce stade des sélections peuvent apparaître abérantes pour un usage en tant que plante de couverture.

Un recoupement avec les bases de données internationales et la littérature (technique et scientifique) a ensuite été effectué pour aboutir à la sélection de 53 espèces présentes en Guadeloupe que nous détaillons ci-après. Au final, seul 7 espèces ont été testées (voir 4.2, notées en gras dans le tableau ci-dessous) compte tenu des contraintes de notre étude (maîtrise de l'enherbement par mécanisation impossible). Cependant, une phase de collecte de semences (ou boutures) suivie d'une phase d'essai de multiplication a été réalisé pour certaines espèces en vue de vérifier la faisabilité de leur mise en culture dans notre écologie.

	Genre	espèce		Genre	espèce
1	<i>Aeschynomene</i>	<i>americana</i>	28	<i>Indigofera</i>	<i>spicata</i>
2	<i>Alysicarpus</i>	<i>vaginalis</i>	29	<i>Lablab</i>	<i>purpureus</i>
3	Arachis	pintoii	30	<i>Lantana</i>	<i>montevidensis</i>
4	<i>Axonopus</i>	<i>compressus</i>	31	Macroptilum	atropurpureum
5	<i>Brachiaria</i>	<i>decumbens</i>	32	<i>Medicago</i>	<i>sativa</i>
6	<i>Brachiaria</i>	<i>humidicola</i>	33	<i>Mucuna</i>	<i>pruriens</i>
7	<i>Cajanus</i>	<i>cajan</i>	34	Neonotonia	wightii
8	<i>calopogonium</i>	<i>mucunoides</i>	35	<i>Paspalum</i>	<i>notatum</i>
9	<i>Canavalia</i>	<i>ensiformis</i>	36	<i>Pennisetum</i>	<i>purpureum</i>
10	<i>Canavalia</i>	<i>rosea</i>	37	<i>Pueraria</i>	<i>phaseoloides</i>
11	<i>Centrosema</i>	<i>virginianum</i>	38	<i>Rhynchosia</i>	<i>minima</i>
12	<i>Chamaecrista</i>	<i>diphylla</i>	39	<i>Rhynchosia</i>	<i>reticulata</i>
13	<i>Chamaecrista</i>	<i>obcordata</i>	40	<i>Stenotaphrum</i>	<i>secundatum</i>
14	<i>Clitoria</i>	<i>ternatea</i>	41	<i>Stylosanthes</i>	<i>guianensis</i>
15	<i>Commelina</i>	<i>diffusa</i>	42	Stylosanthes	hamata
16	<i>Crotalaria</i>	<i>spp</i>	43	<i>Tephrosia</i>	<i>cinerea</i>
17	Cynodon	dactylon	44	<i>Tephrosia</i>	<i>senna</i>
18	Desmodium	adscendens	45	<i>Tripogandra</i>	<i>serrulata</i>
19	<i>Desmodium</i>	<i>axillare</i>	46	<i>Tripsacrum</i>	<i>laxum</i>
20	Desmodium	intortum	47	<i>Vicia</i>	<i>hirsuta</i>
21	<i>Desmodium</i>	<i>procumbens</i>	48	<i>Vigna</i>	<i>hosei</i>
22	<i>Desmodium</i>	<i>scorpiurus</i>	49	<i>Vigna</i>	<i>luteola</i>
23	<i>Desmodium</i>	<i>tortuosum</i>	50	<i>Vigna</i>	<i>unguiculata</i>
24	<i>Desmodium</i>	<i>triflorum</i>	51	<i>Wedelia</i>	<i>trilobata</i>
25	<i>Digitaria</i>	<i>decumbens</i>	52	<i>Zebrina</i>	<i>pendula</i>
26	<i>Echinochloa</i>	<i>colona</i>	53	<i>Zornia</i>	<i>microphylla</i>
27	<i>Eleusine</i>	<i>indica</i>			

Fabacées

1. Aeschynomene americana

Présence en Guadeloupe :

Très courante. Nom vernaculaire, « Hontèz fimèl », « american joint vetch » [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

De 0 à 1 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle ou semi-pérenne à port érigé de type arbustif. Hauteur de 1 à 2 m. Système racinaire pivotant.

Sol :

Adapté à un spectre de sol large, mais préférence toutefois pour des sols sableux et frais. Tolère très bien les sols peu fertiles. Aptitude modérée à stabiliser les sols.

Eau :

Besoin en précipitations de 1 000 à 2 000 mm annuels. Sensible à la sécheresse mais tolérant à l'inondation.

Température et lumière :

Optimum de température entre 15 et 28°C.

Maladies et ravageurs :

On note seulement une sensibilité des graines à l'oïdium.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).



Sources : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Aeschynomene_ americana.htm

Conclusion : Espèce non retenue car de développement trop important.



Fabacées

2. Alysicarpus vaginalis

Présence en Guadeloupe :

Oui [2].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Inde, Asie du sud, Îles Pacifiques, Afrique de l'est, Amérique du sud, États-Unis, assez commune dans les Antilles [1] [2].

Altitude :

0 à 400 m [2].

Biologie, croissance et développement :

Annuelle ou pérenne selon les accessions, parfois suffrutescente à branches prostrées parfois ascendantes aux extrémités. Feuilles simples à forme ovale d'environ 2,5 cm de longueur. Rencontrée dans les savanes xéro-héliophiles et littoral sableux ou calcaires [1] [2]. Hauteur comprise entre 10 cm et 1 m selon les conditions pédo-climatiques rencontrées [3]. Serait utilisé en vergers (sans plus de précisions) [3]. Dans un essai à Cuba, *Alysicarpus vaginalis* – en tant qu'adventice – disparaît sous la pression de *Neonotonia wightii* [4].

Sol :

Préfère les substrats sableux, mais en raison de sensibilité aux nématodes, est souvent cultivé en sols argileux [1]. Plante à potentiel intéressant en ce qui concerne la lutte contre l'érosion. Adapté à des sols de pH variant entre 5,5 et 8.

Eau :

N'aime pas les excès d'eau. Relativement tolérante à la sécheresse. Demande un sol bien drainé [1]. Besoin de précipitations entre 600 et 3 000 mm par an [3].

Température et lumière :

Optimum de température entre 18 et 27°C [3].

Maladies et ravageurs :

Sensible aux nématodes [1] principalement de type Meloidogynes [3].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [4] Gutierrez et al. (2002). Effect of *Neonotonia wightii* cover on changes in the flora of Valencia Late orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) plantations. *Cultivos Tropicales* 23 (3) : 5-9



Sources : http://www.botany.hawaii.edu/faculty/carr/images/aly_vag_cu.jpg ;

http://www.tropicalforages.info/kev/Forages/Media/Html/Alvsicarpus_vaginalis.htm

Conclusion : « ++ ». Vérifier exigences pédo-climatiques et hauteur. Attention ! Annuelle ou pérenne selon accessions. Et cf. ref biblio [4].

3. Arachis pintoï

Présence en Guadeloupe :

Oui.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originnaire du centre du Brésil, *A. pintoï* a été introduite en Australie, Etats-Unis et plusieurs pays de l'Asie du Sud-Est, Amérique du Sud et Centrale, et Pacifique.

Altitude :

Espèce de basse altitude, excepté au Brésil où elle est cultivée jusqu'à 1 400 m d'altitude sous caféier.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne stolonifère formant un tapis dense de stolons et de rhizomes de 20 cm d'épaisseur environ. La colonisation du milieu est facile grâce à son comportement stolonifère. Très tolérante aux pressions de pâturage les plus importantes.

Sol :

De préférence sols drainants de texture sableuse à argileuse, à pH bas ou neutre, et peu regardant vis à vis de la fertilité du sol. Peine à demeurer sur des sols régulièrement en excès d'eau, ou sols argileux mal structurés. Très tolérant à des taux élevés de Al et Mn, par contre peu tolérant aux excès de salinité.

Eau :

Besoin de préférence de précipitations supérieures à 1 100 mm par an. Peut toutefois supporter des saisons sèches d'au moins 4 mois. Tolérant vis à vis des excès d'eau temporaires.

Température et lumière :

Très adapté aux situations ombragées.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Très bonnes association avec les graminées rampantes à comportement « agressif » tels que, *Brachiaria decumbens*, *B. dictyoneura*, *Paspalum notatum*, *Axonopus affinis*, *Digitaria eriantha*, *Cynodon dactylon*. Association possible également avec des graminées à port plus dressé, comme *Panicum maximum*, avec laquelle la Fabacée colonise les espaces entre les plants.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Observation en cours en carré. Tient très difficilement en carême. Colonisation lente. A suivre.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Arachis_pintoï.htm

Conclusion : « + » mais attention à :

- Besoins en eaux
- Problème arrachage, désherbage
- Plante hôte de *Diaprepes*.

Poacées

4. *Axonopus compressus*

Présence en Guadeloupe :

Oui, commune [2]. Nom vernaculaire « savannah grass », « zèb si », « zèb si mal ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre les 27° N et S.

Altitude :

0 à 800 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne, glabre aux caractères très proches de *A. affinis* mais toutefois plus robuste et stolonifère. Hauteur de 5 à 60 cm et pouvant former un « matelas » végétal dense de 15 cm. Floraison toute l'année. Colonisation du milieu essentiellement par rhizomes et stolons.

Sol :

De préférence des sols frais et sableux. Bonne capacité à stabiliser les sols et à lutter contre l'érosion, et ce d'autant plus que sa croissance est rapide.

Eau :

Un minimum de 750 mm par an est nécessaire.

Température et lumière :

Bonne croissance en situation ombragée. Intolérance totale aux situations marécageuses.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Avec notamment *Cynodon dactylon*, *Trifolium repens* et *Desmodium triflorum* (cf. photo).

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Axonopus_compressus.htm

Conclusion : « + » à voir pour association. Attention pour sols frais et sableux de préférence.

5. *Brachiaria decumbens*

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre 27°N et S.

Altitude :

0 à 1 750 m.

Biologie, croissance et développement :

Expansion rapide. Port dressé. Plante de type C4 (photosynthèse). Hauteur de pousse non référencée (paraît importante). Feuilles de 8 à 10 mm de large. Forte résistance aux pressions de pâturages. Bon fourrage.

Un bon couvert végétal est obtenu en 3 mois.

Sol :

Adapté à un large spectre de sols, allant des sols acides à neutres et pour des fertilités faibles ou importantes. Confère une bonne couverture de sol, facilite l'infiltration de l'eau, améliore la résistance à l'érosion, séquestre plus de carbone qu'un pâturage naturel, maintient ou améliore la fertilité du sol. L'une des meilleures graminées pour les sols à teneurs faibles en N et P. Requière toutefois des apports d'N fréquents dans un objectif de pâturage à fort rendement.

Eau :

Plante de climat tropical humide. Toutefois bonne tolérance à la sécheresse. Adapté à une saison sèche jusqu'à 4 à 5 mois. Préférence de précipitations autour de 1 500 mm voire plus. En saison sèche, *Pennisetum purpureum* et *Tripsacum laxum* présentent de meilleurs rendements.

Température et lumière :

Croissance optimale à 30-35°C. Tolérant à l'ombre (utilisation sous cocotiers et Hevea).

Maladies et ravageurs :

Sans problèmes sauf vis à vis des Cercopides (spittlebugs).

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Plante agressive (*B. decumbens* est la moins agressive des *Brachiaria*). Association à long-terme difficile avec légumineuses. Dans l'ordre décroissant de compatibilité : *Desmodium heterophyllum*, *D. ovalifolium*, *Centrosema*, *Pueraria*. Un travail au Costa Rica révèle que *Arachis pintoi* serait la légumineuse possédant la plus forte persistance.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : <http://www.fao.org/.../doc/gallery/pictures/bradec.htm> et <http://www.agrocosta.com.br/variedades/brachiarias5.htm>

Conclusion : Non sauf mécanisation possible (de préf. *B. humidicola*)

6. *Brachiaria humidicola*

Présence en Guadeloupe :

Oui.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Afrique tropicale. Fiji dans le Pacifique.

Altitude :

1 000 à 2 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne très stolonifère, ce qui lui confère une bonne et rapide capacité de couverture et un rôle efficace dans le contrôle des adventices.

Sol :

Préfère les sols profonds, fertiles à pH important. Graminée très efficace contre l'érosion.

Eau :

Bonne tolérance à la sécheresse, ainsi qu'aux excès d'eau.

Température et lumière :

Optimum de température autour de 32-35°C.

Maladies et ravageurs :

Résistante aux maladies et ravageurs, notamment *Deois incompleta*.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Difficile à associer à cause de sa végétation dense. On note des réussites avec *Desmodium heterophyllum* à Fiji, ainsi que *Trifolium semipilosum* et *Lotonosis bainesii* au Zimbabwe.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : <http://www.fao.org/.../doc/Gallery/pictures/brahum.htm> et <http://www.agrocosta.com.br/variedades/brachiarias1.htm>

Conclusion : Non sauf mécanisation possible.

7. *Cajanus cajan*

Présence en Guadeloupe :

Oui, très courante. Nom vernaculaire « Pois d'Angole », « Pwa dibwa », « Pwa lizyè » [2].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originale d'Afrique, largement cultivée dans la plupart des pays tropicaux et sub-tropicaux [2].

Altitude :

0 à 800 m [2] [3].

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle à semi pérenne. Se présente sous la forme d'un arbuste érigé semi ligneux pouvant atteindre 4 à 5 m de haut. Sa hauteur se limite toutefois en général à 0,8 - 1,5 m. Le système racinaire est profond et pivotant.

Sol :

Adapté à un large spectre de sols allant des sols sableux aux sols argileux les plus lourds, et un large spectre de pH avec un optimum entre 5 et 7. La capacité à stabiliser le sol et à lutter contre l'érosion est limitée. Faible potentiel d'augmentation de la teneur en azote du sol.

Eau :

Tolérance importante concernant la plage de besoins en eau. L'une des plus tolérantes à la sécheresse parmi les Fabacées. Les besoins annuels en terme de précipitations se situent entre 700 et 2 500 mm.

Température et lumière :

Très tolérant à la chaleur. Optimum de température entre 20 et 28 °C. Tolérant à l'ombre.

Maladies et ravageurs :

A. cajan est sujet à un certain nombre de maladies et ravageurs, mais la plupart ne représentent pas de pression et de dégâts de grande importance [1] [3]. Parmi les plus courants, on peut citer : termites, chenilles, mineuses des tiges et des gousses, mouches à galles, *Coccus elongatus*, *Lycaena boetica*, le nématode *Helicotylenchus dihystra*, *Fusarium udum* [1]. Toutefois, d'après Lapointe (2003), la plante est hôte de *Diaprepes spp.*, charançon ravageur d'importance en culture d'agrumes.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [4] Lapointe, S.L., 2003, Leguminous cover crops and their interactions with Citrus and *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera: Curculionidae), *Florida Entomologist* 84 (1), pp.80-85.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Cajanus_cajan.htm

Conclusion : Non retenu car développement trop important et plante hôte de *Diaprepes*.

Fabacées

8. Calopogonium mucunoides

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Largement présente sous les tropiques. De 26°N à 30°S.

Altitude :

De 0 à 2 000 mètres mais préfère les basses altitudes.

Biologie, croissance et développement :

Vigoureuse, grimpante et volubile. Représente généralement une masse de végétation de 30 à 40 cm de haut. Feuilles trifoliées à folioles ovales de 4-5 cm de long et un peu moins en largeur. Installation facile du végétal. Excellente capacité de contrôle des adventices.

Sol :

Adapté à un large spectre de textures et de pH avec optimum entre 4,5 et 5.

Eau :

Au moins 1 200 mm par an. Excellente tolérance aux excès d'eau. S'adapte aux périodes de sécheresse selon son intensité, soit par la perte de ses feuilles, soit par un phénomène de mort et de régénération à la saison humide.

Température et lumière :

Climats les plus chauds et humides (sans autre précision). Peut pousser en conditions de lumière limitée.

Maladies et ravageurs :

Sensible à un virus (non précisé) au Guatemala, Costa Rica et Panama.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Excellente compatibilité, même avec les graminées les plus hautes.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Calopogonium_mucunoides.htm

Conclusion : Non retenu car développement trop important et besoins en eau importants.

9. Canavalia ensiformis

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Tropiques des deux hémisphères.

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Plante herbacée annuelle vigoureuse, se comportant en plante grimpante ou arbuste subéreux. Feuilles de 20 cm de long et 10 cm de large. Pas de données sur la hauteur du plant.

Sol :

Eau :

Résistante à la sécheresse.

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

N'est pas fait pour cette écologie. La plante est facilement bloquée et pas seulement en carême. Son développement ne permet pas d'installer une couverture.



Sources : www.css.cornell.edu/.../AF/pics/Censiform.jpg;

<http://biotech.tpo.aov.tw/plantipa/2/Canavalia%20ensiformis%20DC...ipa>;

Conclusion : « - » Pas adapté en climat sec comme PdC mais à voir comme engrais vert en hivernage. Pourrait être sinon intéressante ailleurs.

10. Canavalia rosea

Présence en Guadeloupe :

Oui. Plante commune. Communément appelé « pwa bod lanmè », « vonvon », « pwa vonvon », « pwa kabrit », « pwa makendal ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Présente aux Etats-Unis, Bahamas, Mexique, Amérique Centrale, Grandes Antilles, Trinidad, Amérique du Sud, Asie, Afrique.

Altitude :

0 à 100 m.

Biologie, croissance et développement :

Liane rampante radicante presque entièrement glabre. Floraison de novembre à mars. Présente sur littoral sableux. Végétation de plage et d'arrière-plage.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non étudié en station mais observé sur le littoral entre la plage de l'Etang et Petite Sucrierie. Le développement très traçant et la longueur des entre-nœuds ne permettent que d'installer une couverture partielle. Quant à passer en sols argileux ??! Essence abandonnée.



Sources : www.floridata.com/ref/C/images/cana_ro2.jpg

<http://rps.uvi.edu/VIMAS/bavbean.jpg>

Conclusion : Non retenu car d'écologie de bord de mer et entre-nœuds trop long, couverture insuffisante.

Fabacées

11. Centrosema virginianum

Présence en Guadeloupe :

Oui [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

De 35°S à 40°N. Toutes les Antilles et de l'Uruguay à la côte Est des Etats-Unis [3].

Altitude :

0 à 300 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Liane pérenne, grêle, rampante et grimpante

Sol :

Acide ou alcalin et des sables aux argiles [2] [3].

Eau :

500 à 1 000 mm annuels. Tolérante à la sécheresse (davantage que *C. pubescens*) et moyennant tolérante aux excès d'eau [2] [3].

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Plante bien connue car présente spontanément dans l'écologie de la station et à Beaugendre. Feuilles à très faible pouvoir couvrant, plante très volubile. Aucun intérêt comme plante de couverture.



Source : http://cricket.biol.sc.edu/herb/CC/Centrosema_virginianum1.jpg

Conclusion : Non retenu car développement trop important et faible pouvoir couvrant.

Caesalpiniacées

12. Chamaecrista diphylla

Présence en Guadeloupe :

Oui, mais semble très rare à trouver. Communément appelée « Hediondilla ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Présente dans le Nord de la Caraïbe, Mexique, Amérique Centrale, moitié Nord de l'Amérique du Sud.

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Herbe prostrée ou ascendante, subligneuse à la base, glabre. Hauteur jusqu'à 50 cm, souvent très ramifiée, à branches étalées ou diffuses. Ecologie non connue.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.



Source : <http://fm1.fieldmuseum.org/vrrc/index.php?page=results&genus=Chamaecrista>

Conclusion : « + » mais vérifier couverture et hauteur.

Caesalpiniacées

13. Chamaecrista obcordata

Présence en Guadeloupe :

Oui, plante assez commune

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Endémique des Petites Antilles. Pas plus de précisions.

Altitude :

0 à 80 m.

Biologie, croissance et développement :

Arbrisseau souvent prostré ou diffus, tortueux. Hauteur entre 10 et 100 cm. Rameaux rigides, lisses, ou peu striées, glabres. Floraison presque toute l'année, surtout en jours courts. Se trouve surtout sur falaises calcaires.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Pas de photos disponibles

Conclusion : « ? » besoin de plus d'infos ou trouver la plante.

14. Clitoria ternatea

Présence en Guadeloupe :

Oui, toutefois assez rare [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Australie et Océanie, Asie du Sud Est, Amérique du Sud [3].

Altitude :

0 à 1800 m de manière générale [2] [3]. 0 à 400 m pour la Guadeloupe [1].

Biologie, croissance et développement :

Liane pérenne à base ligneuse. Système racinaire pivotant. Port rampant et grimpant [1] [2] [3]. Manque de persistance comme plante de couverture [2] [4].

Sol :

Adapté à un large spectre de sols allant des sables aux argiles lourdes. Supporte les pH importants [2]. Mauvaise capacité à lutter contre l'érosion [3].

Eau :

Besoins annuels à partir de 400 mm, mais avec de meilleures performances vers 1500 mm annuels. Bonne tolérance à la sécheresse. Aucune tolérance aux excès d'eau et à l'inondation [2] [3]

Température et lumière :

De 15 à 35°C. Tolérance à l'ombre [3].

Maladies et ravageurs :

Sensibilité aux nématodes et semble-t-il à certains virus [2] [3].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Utilisé à Cuba dans un essai agrumes avec *Stylosanthes guianensis*, *Neonotonia wightii*, et est déconseillée à l'issue de cet essai [4]. Possible également avec de nombreuses graminées [2].

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [4] Pérez, *et al.* (2001). Impacto sobre el suelo de leguminosas herbáceas como mejoradores de las coberturas naturales en plantaciones de cítricos. Ensaíos e ci., Campo Grande – MS, v. 5, n°2, pp 93-116.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Clitoria_ternatea.htm

Conclusion : (+) Volubile à buissonnante et non persistante à persistante selon accessions. Les cubains [4] la déconseillent, d'autres contacts dans le monde (chercheurs sur Fabacées et fourragères) la conseilleraient en raison de sa tolérance à la sécheresse.

Commelinacées

15. Commelina diffusa

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune. Nom commun Kiraj ou curage. [1]

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 1 200 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Herbe pérenne souvent en peuplements denses. Tiges rampantes, radicales, molles. Préfère les lieux ombragés et humides. Rudérale et arvale [1].

Essai en café au Nicaragua comme plante de couverture : bonne occultation des adventices, croissance et établissement rapide, malheureusement la plante ne survit pas à la saison sèche [2]. Caamal-Maldonado [3] et Anaya [4] citent un article traitant de l'usage de Commelinacées dont *Commelina diffusa* comme couverture de sol installée et laissée en extensif sous caféiers (Coatepec, Veracruz – Mexique). Ces Commelinacées ont un effet allélopathique sur les adventices, notamment sur *Bidens pilosa* et *Mimosa pudica*.

On sait par ailleurs que le curage est parfois utilisé sous bananeraie (pas de référence biblio).

Sol :

Eau :

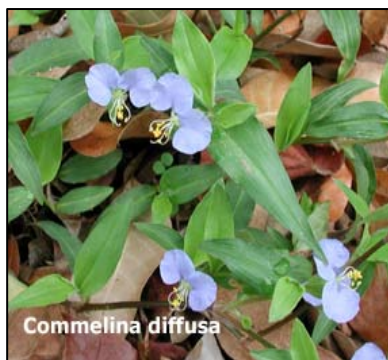
Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Bradshaw et al. (1995). Use of perennial cover crops to suppress weeds in Nicaraguan coffee orchards. International Journal of pest management 41 : 185-194.
- [3] Caamal-Maldonado et al. (2001). The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. Agron. J. 93 :27-36.
- [4] Anaya A.L. (1999). Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems. Critical reviews in Plant Sciences.



Sources : http://www.jardimdeflores.com.br/ERVAS/JPEGS/commelina_diffusa.jpg

http://www.dld.go.th/nutrition/exhibition/native_grass/other/Commelina%20diffusa.htm

Conclusion : Pas adapté aux vergers guadeloupéens mais incontournable comme PdC et donc à faire figurer en fiche plante de couverture.

16. *Crotalaria spp.*

Présence en Guadeloupe :

Oui (25 espèces en Guadeloupe).

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Annuelle ou arbrisseau pérenne, à port érigé. Enracinement pivotant et profond. Demeure vert même en saison sèche. Les hauteurs de plantes sont très variables d'une espèce à l'autre. Jusqu'à 2-3 m pour *C. anagyroides*, 1 à 1,5 m pour *C. retusa* [2] et 40-60 cm pour *C. podocarpa*.

Sol :

En sols sableux, à l'exception de *C. macrocalyx* qui préfère les sols argileux [1].

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Propriétés nématocides.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Godefroy, J (1988). Observations de l'enracinement du stylosanthes, de la crotalaire et du flemingia dans un sol volcanique du Cameroun – Fruits, Vol. 43, n°2, pp 79-86.



Sources : http://cricket.biol.sc.edu/herb/CC/Crotalaria_pallida2.jpg

<http://www.vusat.org/learning/agri/FAQs/media/images/crotalaria.jpg>

Conclusion : Non retenu car développement trop haut ou alors pouvoir couvrant trop faible. Pourtant propriétés nématocides reconnues.

Poacées

17. Cynodon dactylon

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune [2]. Nom vernaculaire « Bermuda grass », « chyendan », « ti-chyendan ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre les 30° N et S.

Altitude :

0 à 1 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne, rampante (stolons et rhizomes). Hauteur jusqu'à 40 cm en moyenne. Colonisation rapide grâce aux stolons et rhizomes. Supporte les fortes interventions (pâturage ou fauchage). Possèderait un fort pouvoir allélopathique au détriment des cultures, du moins en culture de canne à sucre (com. Pers. Pascal Marnotte – Cirad de la Réunion).

Sol :

Adapté à un large spectre de sols en raison d'une grande disponibilité variétale. Préférence toutefois pour les sols bien drainés, avec une certaine fertilité, ou dans le cas de sols argileux ou limoneux, que ceux-ci ne soient pas sujets à inondations. Bonne capacité à lutter contre l'érosion.

Eau :

Besoin de 625 à 1 700 mm annuels. Peut supporter les inondations. Bonne tolérance à la sécheresse grâce notamment aux rhizomes comme organe de survie et de réserve.

Température et lumière :

Optimum de température de 35°C. Croissance très ralentie en dessous de 15°C. Sénescence en cas d'ombrage modéré à important.

Maladies et ravageurs :

En maladies, les feuilles peuvent être attaquées par *Helminthosporium*. Sujet aux nématodes à galle des racines en sols sableux.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Compatibilité notés pour *Trifolium repens*, *Stylosanthes humilis* et *Lespedeza spp.*

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Etude toujours en cours. Les premiers résultats montrent une bonne pérennité mais une installation lente avec recouvrement partiel. De nombreux adventices passent au travers. Bonne tolérance à la sécheresse même si la plante se bloque en carême et sèche sans toutefois mourir.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Cynodon_dactylon

Conclusion : « ++ ». En cours d'essai.

Fabacées

18. **Desmodium adscendens**

Présence en Guadeloupe :

Oui, commune. Nommé communément « trèf savann », « kouzen ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Présente en Asie tropicale, Afrique tropicale, Amérique tropicale..

Altitude :

0 à 500 m.

Biologie, croissance et développement :

Herbe couchée, ascendante aux extrémités, hauteur jusqu'à 60 cm. Prairiale. Se trouve en prairies, savanes humides, forêts : chemins forestiers.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Etude encore en cours. Plante trouvée à Neufchâteau dans la parcelle de chou-palmiste en compagnie d'*Arachis pinto* et offrant une très bonne couverture. La plante s'est révélée sensible à la sécheresse du carême de Vieux-Habitants mais beaucoup moins que prévu. Elle se maintient avec difficulté mais ne meure pas alors qu'elle n'a presque pas été arrosée. L'installation a toutefois l'air d'être longue et le couvert peu épais. En attente de la saison des pluies pour finir d'observer son comportement.



Sources : <http://www.rain-tree.com/Plant-Images/amorseco-pic.htm>

<http://darwin.bangor.ac.uk/flora.html>

Conclusion : En observation. Non indiqué pour écologies sèches même si les plants arrivent à se maintenir. A voir en climat plus humide.

19. Desmodium axillare

Présence en Guadeloupe :

Oui. Nommé communément « trèf couran », trèf ranpan », « kouzen ». Assez commune.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Présente au Mexique, Amérique centrale, Grandes et petites Antilles, Nord de l'Amérique du Sud.

Altitude :

0 à 650 m.

Biologie, croissance et développement :

De part le peu de références bibliographiques, cette essence végétale n'a jamais été utilisée comme plante fourragère ou de couverture.

Herbe stolonifère radicante. Hauteur **jusqu'à 60 cm**. Floraison d'avril à août. Présente dans des écologies de type prés et savanes humides, forêt mésophile, sous-bois, bord de sentier forestier.

Sol :

Eau :

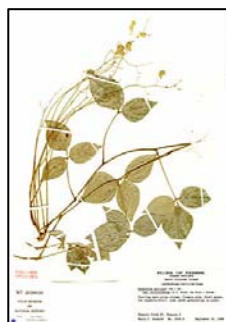
Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.



Sources : <http://www.kingsnake.com/westindian/desmodiumaxillare2.JPG>

<http://fm1.fieldmuseum.org/vrrc/index.php?page=results&genus=Desmodium>

Conclusion : « ?+ ». Trouver la plante et vérifier : besoin en eau, pouvoir couvrant. D'autres plantes plus prioritaires.

Fabacées

20. Desmodium intortum

Présence en Guadeloupe :

Oui, mais présence très rare [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Native du nord de l'Amérique du Sud et Amérique Centrale. Etendue aux Caraïbes présente plus largement sous les tropiques suite à sa culture comme plante fourragère [1] [3].

Altitude :

800 à 3000 m. Pas de données pour la Guadeloupe [2].

Biologie, croissance et développement :

Décrit comme sous arbrisseau robuste rampant et grimpant [1] [2] ou comme arbrisseau semi-érigé à rampant [3]. Plante pérenne à système racinaire pivotant important et tiges radicantes. [1] [2] [3]. Bonne capacité à lutter contre les adventices une fois installé [2].

Sol :

Adapté aux sols allant d'une texture de limons sableux aux argiles limoneuses, à pH supérieur à 5 et pouvant aller jusqu'à 8 [2] [3].

Eau :

Besoins en eau supérieurs à 900 mm par an. Peu tolérant à l'inondation et modérément tolérant à la sécheresse.

Température et lumière :

De 12 à 30 °C, avec optimum autour de 25-30 °C. Tolérance à l'ombre [2] [3].

Maladies et ravageurs :

Sensibilité éventuelle *Meloidogyne hapla* [3].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Avec certaines graminées éventuellement mais peu pratiqué [2].

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Etude encore en cours en carré. Bonne levée. Port assez érigé dans un premier temps puis une ramification à la base de la plante intervient. Légèrement sensible au carême mais moins qu'attendu. La plante est bloquée mais ne meure pas. Egalement planté en essai sur toute petite surface chez Jean-Marc Petit. La couverture n'est pas satisfaisante pour le moment, il faut voir une fois les ramifications à la base développées. En attente de la saison des pluies pour finir d'observer son comportement.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Desmodium_intortum.htm

Conclusion : « ++ ». En essai. Port intéressant. Vérifier : l'éventuelle volubilité, le caractère envahissant ou de compétition avec la culture, les besoins en eau / au climat.

Attention, nécessiterait un rhizobium faute de pouvoir s'installer.

Fabacées

21. Desmodium procumbens

Présence en Guadeloupe :

Oui. Nommée communément « kouzen », « kollan », trèf ». Assez rare à trouver.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Présente au Mexique, Amérique centrale, Grandes et petites Antilles, Nord de l'Amérique du Sud.

Introduite en Afrique et aux Philippines.

Altitude :

0 à 500 m.

Biologie, croissance et développement :

De part le peu de références bibliographiques, cette essence végétale n'a jamais été utilisée comme plante fourragère ou de couverture.

Herbe à tiges grêles étalées, de longueur pouvant atteindre 1 m. Floraison de mai à février. Se rencontre en prairies et savanes humides, bords de rivières, embouchures, fossés, vieux murs. Plante rudérale.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non étudiée en station mais observée dans la vallée de Beaugendre en petite altitude. Non adapté au climat xérophile de côte sous le vent à basse altitude.

Pas de photos disponibles

Conclusion : «+». Trouver la plante et vérifier : besoin en eau, pouvoir couvrant. D'autres plantes plus prioritaires.

22. Desmodium scorpiurus

Présence en Guadeloupe :

Oui. Nommée communément « kouzen trèf », « trèf savann », « ti trèf », « kollan ». Assez rare.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originaire de l'Amérique tropicale et aujourd'hui présente dans l'ensemble de la zone tropicale [1] [2].

Altitude :

0 à 450 m [2].

Biologie, croissance et développement :

Herbe plus ou moins couchée à ascendante (parfois grimpante [1]), très ramifiée. Floraison surtout de novembre à mars et de juin à août. Se rencontre en prairies et savanes humides, bords de rivières, embouchures, fossés, vieux murs. Plante rudérale [2].

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [3] Firth, D. (1995). Groundcovers in macadamia orchards. The sixth conference of the Australian council on tree and nut crops, Lismore, NSW, Australia, 11-15 september 1995.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non étudiée en station mais observée dans la vallée de Beaugendre en petite altitude. Non adapté au climat xérophile de côte sous le vent à basse altitude.

Pas de photos disponibles

Conclusion : Difficulté à trouver le végétal. Vérifier la volubilité. D'autres plantes plus prioritaires.

23. Desmodium tortuosum

Présence en Guadeloupe :

Oui. Appelée communément « kouzen » ou « kollan » [3].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Caraïbes, Floride, Amérique Centrale et du Sud, Afrique tropicale [1] [2].

Altitude :

Présente de 0 à 600 m en Guadeloupe [3].

Biologie, croissance et développement :

Annuelle ou vivace. Port érigé. Hauteur de **0,6 à 3 mètres**. Feuilles trifoliées avec folioles de forme lancéolée ou elliptique couvertes de poils courts. Plante vigoureuse à installation rapide. Implantation possible par bouturage.

Sol :

Adapté à un large spectre de sols, de préférence sols légers, sableux à argilo-sableux. Optimum de pH autour de 5,6 [2].

Eau :

Besoin en précipitations de 1 000 à 2 600 mm par an [2].

Température et lumière :

Optimum entre 15 et 25°C. Très tolérante à l'ombre.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.



Sources : http://www.hear.org/starr/hiplants/images/hires/html/starr_030808_0069_desmodium_tortuosum.htm

<http://www.ceniap.gov.ve/centrosema/dtor.htm>

Conclusion : Non retenu car développement trop haut.

24. *Desmodium triflorum*

Présence en Guadeloupe :

Oui. Appelée communément « ti trèf », « kod vyolon », « trèf ranapan », « gazon », « trèf gazon », « trèf kat » [2].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Semi tropical. Présence très commune dans la très grande majorité des îles des Caraïbes, ainsi qu'en Australie, sud du Soudan, Côte d'Ivoire, Ouganda, sud du Brésil, Venezuela et Colombie [1] [2].

Altitude :

0 à 600 m [2].

Biologie, croissance et développement :

Herbe basse, traçante-radiante formant un gazon dense. Présente dans les prairies et pelouses. Feuilles trifoliées avec folioles d'environ 2,5 cm de long [1].

Trouvé communément en association avec *Cynodon dactylon* et *Paspalum notatum*. Bonne tolérance au pâturage. Teneur en protéines de l'ordre de 13 à 18 % [1].

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Bonne résistance à la sécheresse [1].

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non étudiée en station mais observée dans la vallée de Beaugendre en petite altitude. Non adapté au climat xérophile de côte sous le vent à basse altitude.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Desmodium_triflorum.htm

Conclusion : « + » Vérifier pouvoir couvrant réel et besoins en eau. A associer ? D'autres plantes plus prioritaires a priori.

Poacées

25. Digitaria decumbens

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Autour de 21-30°N et S. Introduite dans la plupart des pays tropicaux.

Altitude :

De 0 à 1 500 m.

Biologie, croissance et développement :

Appelée communément *Pangola*. Graminée pérenne stolonifère. Une fois établi, la plante est vigoureuse et colonise le milieu très rapidement par stolons. Très bonne concurrence vis à vis des adventices.

Sol :

Adapté à un large spectre de sols allant des sables frais-humide aux argiles lourdes. Peu regardant vis à vis de la fertilité, pousse bien sur sols pauvres. Bonne tolérance à la salinité du milieu. Espèce très efficace dans le contrôle de l'érosion.

Eau :

Besoin moyen en précipitations de 900 à 2 000 mm. Tolérance convenable aux pics de sécheresse une fois établi. Peut supporter des excès d'eau mais de façon temporaire.

Température et lumière :

Croissance satisfaisante à partir de 19-24°C. Croissance encore plus active à partir de 26°C et jusqu'à 40°C.

Maladies et ravageurs :

Le végétal est souvent sensible au cryptogame *Puccinia oahuensis* que soit le lieu dans le monde. On relève aussi la présence d'un virus (non précisé) à Fiji et en Floride.

Le puceron *Sipha flava* est le principal ravageur, ainsi que *Schizaphis hypersiphata* et *Lemma rufotincta*.

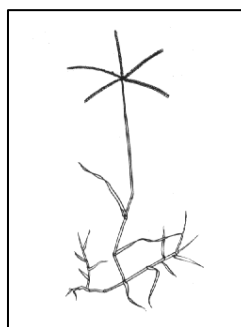
Les principaux dommages sur cette espèce végétale sont causés par pucerons.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Bonne compatibilité avec *Lotonis bainesii*, et quelques réussites avec *Centrosema pubescens*. On note également une association réussie en Floride avec *Stylosanthes humilis* et *Microptilium atropurpureum*. Mais d'une manière générale, l'espèce domine toutes les autres plantes et rend impossible d'autres associations.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : www.fao.org/.../doc/gallery/pictures/digdec.htm et www.fao.org/.../FRG/AFRIS/gallery/Grasses.htm

Conclusion : « ++ ». Espèce 'en liste d'attente' (*Brachiara humidicola* testé en priorité).

Poacées

26. Echinochloa colona

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune [2]. Nom vernaculaire, « Zèb a diri ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 500 m voire 900 m [2].

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle, à chaumes prostrés et étalés. Forme un couvert de 6 cm de hauteur avec panicules atteignant les 15 cm. Sol habitat naturel est constitué de prairies ou plans humides voire inondés au moins une partie de l'année [1] [2].

Sol :

Adapté à un large spectre de sols mais se retrouve de préférence en sols limoneux et argileux.

Eau :

Besoin de 400 à 1 200 mm annuels.

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : <http://www.herbarium.lsu.edu/stinger/GFG001101.jpg>

http://www.or.nrcs.usda.gov/technical/images/pla63a10_small.jpg

Conclusion : Non sauf mécanisation possible. Présente naturellement en station dans les couverts entretenus mécaniquement.

Poacées

27. Eleusine indica

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune [2]. Nom vernaculaire, « goose grass », « pyé poul », « zèb py » poul ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 1 100 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle érigée de 15 à 70 cm de haut.

Sol :

Eau :

Besoin de 500 à 1 200 mm par an. Tolérance conséquente à la sécheresse en raison de son système racinaire extensif. Colonisation rapide du milieu. Bonne capacité à stabiliser les sols notamment sableux.

Température et lumière :

Un minimum de 20°C est préférable.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Source : http://perso.orange.fr/erick.dronnet/images/eleusine_indica1.jpg

<http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~db50/FOTO - Archiv/E...>

Conclusion : « + ». Surveiller la hauteur.

28. Indigofera spicata

Présence en Guadeloupe :

Oui. Communément appelé « digo ranpan », « endigo ranpan », « senfwen ». Plante commune [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originnaire d'Asie et Afrique, elle a été ensuite naturalisée dans le nouveau Monde. Elle aurait été introduite en Guadeloupe en 1928 comme plante de couverture sous vergers [1].

Altitude :

0 à 350 m.

Biologie, croissance et développement :

Herbe prostrée-rampante à rameaux nettement aplatis. Floraison presque toute l'année. Plante ubiquiste [1]. Elle aurait déjà été utilisée comme plante de couverture dans des plantations de thé et café [2]. Son utilisation semble toutefois assez peu fréquente.

Une toxicité des graines envers l'homme et les bovins est rapportée (pas plus de précisions sur la nature de la toxicité ni sur le type d'animaux qu'elle touche) [2].

Stéhlé [4] l'a étudié en Guadeloupe à Duclos. Il ne la conseille pas comme plante de couverture mais comme fourragère et selon une association avec *Panicum maximum* et *Stenotaphrum secundatum*. Plante non retenue pour une recherche de plantes de couverture en vergers en Guinée en raison de sa sensibilité à la sécheresse [5].

Sol :

Adaptée à un large spectre de sols allant des sols sableux aux sols argileux de faible fertilité, avec une préférence toutefois pour les sols argileux. Optimum de pH autour de 5,7. Bonne capacité à lutter contre l'érosion [2].

Eau :

Besoins de 800 à 3 500 mm. Tolérante à la sécheresse selon [2]. Recommandation d'un sol conservant une humidité relativement élevée selon [4]. Mauvaise résistance à la sécheresse et dépendante de l'irrigation selon [5].

Température et lumière :

Optimum de température entre 16 et 27°C. Tolérante à l'ombre [2].

Maladies et ravageurs :

Aurait des propriétés nématocides [3].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

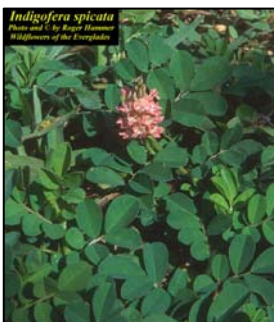
Peut être combiné avec *Cynodon dactylon* [2].

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] US Agricultural Research Service (2000). Annual report of cooperative multistate projects. www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/66070000/S9annualreports/s9ar1999.pdf (mars 2006).
- [4] Stéhlé (1965). Les graminées et légumineuses d'intérêt fourrager à la station d'amélioration des plantes au centre des Antilles françaises. *Qualitas plantarum et materiae vegetabiles* 12 (1) : 48-58.
- [5] Antichan (1952). Les plantes de couverture dans la protection du sol en verger guinéen. *Fruits* 7 (7) : 339-341.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Ne supporte pas la sécheresse contrairement à ce que plusieurs sources bibliographiques prétendent. De plus les taux de germination et de levée sont mauvais. Plante abandonnée.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Indigofera_spicata.htm

29. Lablab purpureus

Présence en Guadeloupe :

Oui, assez commune. Nom vernaculaire, « Pwa boukousou », « Pwa zendyen » [2]

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Essence probablement originaire d'Afrique mais introduite dans la plupart des pays tropicaux [1] [2].

Altitude :

0 à 600 m [2].

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle voire pérenne de courte durée. Liane rampante et grimpante avec tiges d'une longueur pouvant atteindre 5 m. Système racinaire pivotant.

Sol :

Adaptée à un large spectre de sols, allant des sols sableux aux plus argileux. Large spectre de pH également, allant de 4,5 à 7,8. Haut potentiel d'apport d'azote au sol. Bonne aptitude à stabiliser les sols et à lutter contre l'érosion.

Eau :

Besoins en eau de 800 à 2 500 mm annuels. Bien tolérante à la sécheresse une fois établie, où les besoins peuvent descendre à 400 mm par an. Aucune tolérance aux inondations et ne pousse pas dans les sols humides.

Température et lumière :

Optimum de température entre 18 et 28 °C.

Maladies et ravageurs :

On note une sensibilité des racines aux nématodes : *Helicotylenchus dihystra*, *Meloidogyne hapla*, *M. incognita* [1]

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Plantée seule en général [1].

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [3] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Plante non étudiée du fait de sa forte volubilité. Toutefois cette plante pourrait être utilisée pour des petites surfaces comme culture associée afin de commercialiser les pois en marché local. Ceux-ci sont très appréciés (2 euros le kg à écosser). Seule cet usage commercial permettrait de rentabiliser le coût d'entretien (passage régulier et arrachage de ce qui monte sur les arbres).



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Lablab_purpureus.htm

Conclusion : Non retenu car trop volubile. Sauf pour vente des pois « boukousou » comme produit de rente en marché local. Peut alors devenir très intéressant.

Verbenacées

30. *Lantana camara* ou *montevidensis*

Présence en Guadeloupe :

Oui, assez courant pour *L. camara* et assez rare pour *L. montevidensis*. Nom commun « sauge » et mille-fleurs » [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 800 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Les deux espèces sont assez proches, et toutes deux semblent avoir une forte variabilité génétique puisque l'on parle de sujets pouvant atteindre 3m pour l'un et 1m pour l'autre [1].

En tous les cas, il existe des variétés utilisées communément en ornement dans les jardins dont le port est rampant et assurent une certaine couverture du sol. On rencontre par exemple cette plante en couverture aux pieds d'arbres d'ornement en Guadeloupe sur le parking du centre commercial de Destreland. John Mc Laughlin, chercheur à l'université de Floride en horticulture et paysage, la recommande comme plante de couverture ornementale.

Fournet recommande également le genre dans l'introduction de son ouvrage sur les mauvaises herbes des petites Antilles comme plante de couverture à usage commun et aménagement paysager [2].

Un essai en Inde sur mandarinier montre l'impact positif, parmi d'autres facteurs (dont plante de couverture), de l'emploi de *Lantana camara* comme mulch mort sur la productivité, la teneur en eau du sol et le bénéfice net à l'hectare [3].

Sol :

Eau :

Pas de données précises. Toutefois en carême très sec (comme en 2007) à Vieux-Habitants, on constate que les *Lantana* sont toujours turgescents durant toute la période sèche sans qu'aucune irrigation n'ait été pratiquée. En comparaison, des agrumes présents juste à côté sont fanés durant la moitié du carême.

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Fournet & Hammerton (1991). Mauvaises herbes des petites Antilles. Ed. Inra – Techniques et pratiques, 214 p.
- [3] Kumar De *et al.* (2005). Effect of different management practices on productivity and soil moisture conservation under mandarin orange (*Citrus reticulata*) orchard. Environment & Ecology 23 (4) : 739-741.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

A installer en carré. Doute sur la qualité de couverture et le management à terme du couvert (caractère ligneux des tiges), mais sa très forte tolérance à la sécheresse intrigue et son potentiel de couverture suscitent la curiosité.



Sources : <http://www.plantoftheweek.org/>

Conclusion : Contrainte, son coût d'installation : bouturage et plantation.

Fabacées

31. *Macroptilium atropurpureum*

Présence en Guadeloupe :

Oui, espèce acclimatée sur la station du Bouchu (Cirad Vieux-Habitants) [2]. Seule une autre espèce du même genre est présente en Guadeloupe (*M. lathyroides*), essence à port érigé, d'une hauteur allant de 0,3 à 1 m.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre 30°N et S.

Altitude :

Jusqu'à 1 600 m à condition de ne pas trop descendre en température.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne, communément appelée « Siratro », rampante (voire volubile [2]) à enracinement profond. L'enracinement est possible tout le long des tiges (en particulier sols argileux). Les feuilles sont trifoliées avec folioles de formes rondes de 5 cm environ. Installation facile et rapide. Sensible au sur-pâturage. Efficace dans le contrôle des adventices à partir d'un certain stade d'installation.

Sol :

Large spectre de sols, sauf sols mal drainés. Texture sableuse à légèrement argileuse. Plage de pH de 4,5 à 8.

Eau :

Besoin d'un minimum de 615 mm, et de préférence 850 mm. Maximum autour de 1 800 mm. Grande tolérance à la sécheresse en raison de la profondeur de ses racines. Aucune tolérance à l'excès d'eau.

Température et lumière :

Optimum entre 26 et 30°C. Minimum autour de 20°C.

Maladies et ravageurs :

Sensible au *Rhizoctonia solani* sous conditions très humides et à *Uromyces phaseoli* lors de fortes précipitations. Quelques rares cas de mildiou. Sensible au nématode *Helicotylenchus dihystrera* mais résistant à *Meloidogyne javanica* et *Radopholus similis*. Le Siratro est notamment recommandé comme plante de couverture en plantations de bananes pour son rôle de contrôle des nématodes.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Cirad Vieux-Habitants

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Toujours en cours d'étude même si un certain recul a été acquis. De très bons résultats ont été obtenus avec cette plante. Bon pouvoir de suppression des adventices, bonne colonisation du milieu, bonne tolérance à la sécheresse. Toutefois, pour un comportement assez analogue, *Neonotonia wightii* semble légèrement meilleure en terme de couverture et occultation, tolérance à la sécheresse, pouvoir suppressif envers les adventices et légèrement moins volubile. De plus *M. atropurpureum* semble montrer de temps à autre une sensibilité aux tiges, acariens et pucerons.



Sources : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Macroptilium_atropurpureum.htm

Conclusion : « ++ ». En essai. Excellent, sauf volubilité. *Neonotonia wightii* semble encore meilleur.

32. *Medicago sativa*

Présence en Guadeloupe :

Oui mais très rare. Introduite comme plante fourragère, elle n'a pas fait l'objet de récolte récente [1]. Nom vernaculaire, luzerne comme en métropole.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Largement présent dans les zones tempérées à travers le monde : USA, sud du Canada, Europe, Chine, sud de l'Amérique Latine, Afrique du Sud.

Altitude :

De 0 à 3000 m [1] [2] [3].

Biologie, croissance et développement :

Herbe érigée pérenne (selon [1]) ou bi-annuelle à semi-pérenne (selon [2]) de 20 à 80 cm de haut. Feuilles alternes trifoliées.

La luzerne permet de contrôler efficacement les adventices mais un temps conséquent semble nécessaire pour que son développement lui confère cette faculté.

Possède des propriétés allélopathiques sur d'autres végétaux [4].

Sol :

Sols bien drainés de préférence avec une bonne fertilité. Le pH doit être compris entre 6 et 7,8 [2] [3]. Capacité à s'enraciner profondément, toutefois en général 60 à 70 % de l'enracinement a lieu dans les 15 premiers cm [3].

Eau :

Besoins en eau situés entre 750 et 2 000 mm [2]. Tolérance à la sécheresse mais pas aux excès d'eau [2] [3].

Température et lumière :

Optimum de température entre 18 et 25°C, mais selon les cultivars on peut trouver des essences allant d'une tranche de température de -25°C (Alaska) jusqu'à 50°C (Californie) [3].

Maladies et ravageurs :

La luzerne est sujet à divers maladies, ravageurs. Les lister seraient trop long. On dénombre environ 20 maladies d'importance et autant pour les ravageurs, ainsi que quelques virus [3].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Compatibilité avec des graminées peu agressives.

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [4] Anaya (1999). Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agro-ecosystems. Critical reviews in Plant Sciences.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Medicago_sativa.htm

Conclusion : « ++ » mais agit par densité non par pouvoir couvrant direct.

Peut être intéressant mais trouver la bonne variété parmi la diversité, vérifier la possibilité d'importation avec SPV, vérifier l'adéquation avec conditions pédo-climatiques, vérifier hauteur. D'autres plantes plus prioritaires.

33. Mucuna pruriens

Présence en Guadeloupe :

Oui [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Largelement distribué sous les tropiques.

Altitude :

De 0 à 2 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante rampante vigoureuse et volubile. Tiges de plus de 6 m de long. Feuilles grandes, de 20 à 25 cm de long et 8 à 13 cm de large. Long à s'installer au départ. Une fois établi, efficace dans le contrôle des adventices [2].

Aucunes précisions sur le caractère pérenne ou non du végétal [2].

Les gousses possèdent des poils très irritants. Ce ne serait pas le cas de certaines accessions mais l'information reste à vérifier.

Plante, d'après plusieurs bibliographies, qui possède des propriétés allélopathiques sur d'autres végétaux [3].

Sol :

Adapté à un large spectre de sols, texture sableuse à argileuse. Sols légèrement acides [2].

Eau :

De 650 à 2 500 mm [2].

Température et lumière :

Climat chaud et humide sans plus de précisions [2].

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [3] Kohli *et al.* (2001). Allelopathy in agrosystems. Food Products Press. 447 p.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Mucuna_pruriens.htm

Conclusion : Non retenu car trop volubile, annuelle et variété locale irritante.

34. *Neonotonia wightii*

Présence en Guadeloupe :

Oui mais présence toutefois assez rare. Elle a été introduite comme plante fourragère et s'est naturalisée ça et là dans certaines savanes « enrichies » comme à Gardel par exemple (Le Moule) [1].

Le terme *Glycine* est aussi utilisé comme synonyme de genre (avec beaucoup de noms d'espèces synonymes différents).

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originaire de l'Inde et de l'Afrique [1]. Se trouve aussi dans toute l'Asie tropicale, de l'est au centre Afrique et Afrique du sud [3].

Altitude :

0 à 100 m en Guadeloupe [1]. Peut aller bien plus haut dans d'autres régions du monde [2] [3].

Biologie, croissance et développement :

Liane pérenne [3] ou semi-pérenne [2] déclarée rampante [1] ou rampante à grimpante [2] [3] selon les auteurs. Cette essence appartient au sous-genre des *Glycine*. Les feuilles sont trifoliées. Le système racinaire est pivotant [2] [3]. Une fois installée, *Neonotonia* est efficace comme plante suppressive des adventices (même *Imperata cylindrica*), toutefois son temps de colonisation et d'établissement est long [3].

Sol :

Demande des sols profonds et bien drainés, de préférence fertiles. Plage de pH optimale comprise entre 6 et 6,5. Les sols d'origine basaltique ou alluvionnaires lui conviennent. Par contre les sols podzolitiques acides sont à proscrire [2] [3].

Eau :

Besoins en eau de 750 à 1 500 mm par an. La plante montre une assez bonne tolérance à la sécheresse mais présente par ailleurs une susceptibilité aux excès d'eau (en rapport avec les sols qu'elle affectionne). Il est ainsi déconseillé de positionner cette essence à des précipitations dépassant les 1 500 mm [2] [3].

Température et lumière :

Optimum de température autour de 22 à 27°C. Bonne tolérance à l'ombre [2] [3].

Maladies et ravageurs :

Les principales maladies auxquelles *Neonotonia* est sensible sont : *Cercospora* spp., *Sclerotinia sclerotiorum*, *Xanthomonas* spp. et *Pseudomonas* spp.

Son principal ravageur est le charançon *Amnemus quadrituberculatus* (mais est-il présent en Guadeloupe ?) [3].

Montre une résistance aux nématodes *Meloidogyne incognita incognita*, *M. incognita acrita* et *M. javani* [2].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Compatibilité avec graminées, comme par exemple *Panicum maximum*, *Setaria anceps*, *Chloris gayana*, *Melinis minutiflora* et *Pennisetum purpureum* [3].

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

En cours d'étude. Semble s'inscrire dans la lignée de *Macroptilium atropurpureum* mais avec de meilleurs résultats : moins volubile, plus agressive formant un tapis plus dense, moins sensible à la sécheresse. Semble supprimer *M. atropurpureum* quand les deux plantes sont présentes en un même lieu.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Neonotonia_wightii.htm

35. *Paspalum notatum*

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune [2]. Nom vernaculaire, « Bahia grass », « zèb si fimèl », « zèb mouton ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

De 25°N à 30°S.

Altitude :

0 à 2 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Appelée communément *Bahia grass*. Plante pérenne à colonisation par stolons et graines. Les stolons sont dotés de racines conséquentes. La croissance est lente lors de l'établissement et s'intensifie dans un deuxième temps tout en restant modérée. Supporte très bien le pâturage et les tailles rases en formant un couvert dense. Bonne capacité de contrôle des adventices (couvert dense) mais seulement une fois établi.

Sol :

Adapté à un large spectre de sols avec toutefois une préférence pour les textures sableuses. *P. notatum* est souvent utilisé pour stabiliser les terrasses contre l'érosion.

Eau :

Minimum de 750 mm par an, optimum à 1 500 mm. Bonne tolérance à la sécheresse. Tolérance convenable aux excès d'eau.

Température et lumière :

Optimum à 25-30°C. Minimum à 8°C. Non adapté aux situations ombragées.

Maladies et ravageurs :

Sensible à *Claceps paspali* et dans une moindre mesure à *Helminthosporium micropus*.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Association possible avec *Trifolium incarnatum* et *Trifolium repens*. Quelques essais validés aussi avec *Trifolium semipilosum* et *Lotononis bainesii*.

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : www.tarleton.edu/.../introducedforages.htm et <http://cricket.biol.sc.edu/herb/p.html>

Conclusion : « 0 à + ». Espèce faisant partie de l'enherbement naturel entretenu (en association avec d'autres Poacées).

Poacées

36. Pennisetum purpureum

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre 10°N et 20°S. Introduite dans la plupart des pays tropicaux et sub-tropicaux.

Altitude :

De 0 à 2 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Communément appelée *Elephant grass*. Plante pérenne, vigoureuse, robuste avec un système racinaire puissant. Les feuilles ont un port érigé faisant culminer le végétal de 160 à 380 cm. L'expansion du végétal est lente. Une fois établie, la plante est compétitive vis à vis des adventices. Très efficace comme lutte contre l'érosion.

Sol :

Sol profond, fertile, à texture peu compacte.

Eau :

Préférence à des précipitations abondantes de l'ordre de 1 500 mm ou plus. Son système racinaire profond lui permet toutefois de tolérer des périodes de sécheresse. Aucune tolérance aux excès d'eau.

Température et lumière :

Optimum de température autour de 25 à 40 °C. Minimum à 15°C. Tolère une situation semi-ombragée, mais préfère le plein soleil.

Maladies et ravageurs :

La maladie la plus commune est la rouille (*Helminthosporium sacchari*). On ne dénombre pas de ravageur majeur.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Généralement cultivé seul. Il a déjà été noté des associations avec *Pueraria phaseoloides*, *Centrosema pubescens* et *Neonotonia wightii* (très volubile)

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Sources : www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Ht... ; www.piperaduncum.net/.../image004.jpg et http://static.flickr.com/37/79425055_8957c0c7fb_m.jpg

Conclusion : Non retenu car de développement trop important.

Fabacées

37. Pueraria phaseoloides

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

A partir de 23° S, mais les meilleurs résultats se situent en régions équatoriales (à partir de 17,5°). Autrement, toutes zones tropicales humides.

Altitude :

Plante essentiellement de basse altitude. En général en dessous de 600 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante vigoureuse, volubile et grimpante. Colonisation aisée et couverture large du sol à la condition d'une bonne présence d'eau. L'installation est toutefois lente. Les tiges peuvent atteindre 5 à 6 mètres. Système racinaire profond (non quantifié). La masse de végétation atteint 60 à 75 cm sans pâturage. Les feuilles sont grandes et trifoliées : 5 à 10 cm de long. Feuilles et jeunes tiges sont couvertes de poils denses de couleur brune. Sensibilité à un pâturage trop important. L'une des meilleures fabacées pour lutter contre les mauvaises herbes.

Sol :

Grande adaptabilité, des textures sableuses à argileuses, à l'exception des terres très lourdes. Idéal de pH autour de 4 à 5. Problème de carence ferrique à partir de pH 6. Non tolérant aux excès de salinité. Bonne plante de couverture pour lutter contre l'érosion. L'effet sur la structure est toutefois transitoire.

Eau :

Idéal de précipitation à 2 500 mm. Minimum situé aux environs de 1 000 mm. Non tolérant à la sécheresse. Tolérant aux excès d'eau.

Température et lumière :

Optimum à 15°C et minimum à 12°C. Plante typique de climat tropical humide.

Maladies et ravageurs :

Indemne de maladie. Dommages de chenilles aux feuilles si non pâturé.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Bonne compatibilité avec *Brachiaria subquariparia*, *Melinis minutiflora*, *Panicum maximum*, *Pennisetum purpureum*, *Centrosema*, *Calopogonium*. Ne subsiste pas en présence de *Digitaria decumbens* (Pangola) ou *Brachiaria decumbens*.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Pueraria_phaseoloides.htm

Conclusion : Non retenu car trop volubile. A voir cependant pour écologies plus humides. Plantes de couverture de référence dans de nombreuses ressources bibliographiques.

Fabacées

38. Rhynchosia minima

Présence en Guadeloupe :

Oui, commune en Guadeloupe [1]. Et présente sur la station Bel Air de Vieux Habitants sur parcelle papayer, venu spontanément, couvrant et grimpant.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Très largement présente en climat tropical et sub-tropical partout où il y a des sols de texture lourde [2].

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Plante herbacée pérenne + ou – rampant ou couché à rampant [1] [2]. Feuilles de petite taille, 3cm environ. Présente dans les halliers et zones sèches. Rudérale et arvale [1].

Sol :

Sols très argileux [2].

Eau :

Pas de données biblio mais le constat sur parcelle est sans appel, *Rhynchosia* résiste extrêmement bien à la sécherresse.

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non testée mais observée naturellement sur station. La plante semble intéressante car relativement agressive par endroit vis-à-vis des autres plantes et semble posséder une excellente adaptation au climat sec de la station. Toutefois, sa forte volubilité constatée ainsi du fait de ses feuilles de petite taille, on peut s'interroger sur la contrainte en verger due à sa volubilité et sur son réel pouvoir couvrant et suppressif des adventices.



Source : Olivier Damas - Cirad ®

Conclusion : non retenu car trop volubile et pas assez couvrante. Bien d'autres plantes sont à préférer avant d'utiliser celle-ci.

Fabacées

39. *Rhynchosia reticulata*

Présence en Guadeloupe :

Oui, mais présence assez rare. Communément appelé « Pwa sikriyé », « pwa zwézo », « pwa zozyo ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 100 m.

Biologie, croissance et développement :

Liane rampante pubescente dont les tiges peuvent atteindre jusqu'à 6 m de long. Floraison de novembre à mars. Présence dans les écosystèmes de type littoral sec, sableux ou calcaire.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Pas de photos disponibles

Conclusion : Non retenu car trop difficile à trouver, se référer davantage à *Rhynchosia minima*.

Poacées

40. *Stenotaphrum secundatum*

Présence en Guadeloupe :

Oui, assez courante [2]. Nom vernaculaire, « Gwo chyendan », « Chyendan blan », « Ste Augustine grass ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 500 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne stolonifère, rampante et radicante de 10 à 50 cm de haut. Son habitat naturel est constitué de zones marécageuses à proximité de littoral. Toutefois, Fournet hésite entre un habitat en zones fraîches ou humides de sol ou en zone de pentes calcaires.

Sol :

Adapté à un très large spectre de sols (texture, pH, etc.). Préfère toutefois les sols côtiers sableux et alcalins, avec comme exemple ceux des Everglades de Floride. Excellente aptitude à lutter contre l'érosion.

Eau :

Pas de données précises mais semble se développer dans des zones humides : sols sableux ou boueuses d'arrière mangroves ou pentes calcaires sèches (zone des Grands Fonds). Tolère de courtes périodes sèches et excellente tolérance aux excès d'eau et inondations. Colonisation rapide et aisée du milieu aux moyens de ses stolons.

Température et lumière :

Adapté aux expositions ombragées.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Stenotaphrum_secundatum.htm

Conclusion : « + ». Mais attention, Fournet hésite entre :

- Zones fraîches ou humides de sol (-)
- Pentas calcaires sèches (+) A vérifier !!!

Se rappeler également que ce végétal ne s'implante que par bouture avec les coûts de main-d'œuvre qui en découlent.

Fabacées

41. *Stylosanthes guianensis* var. *guianensis*

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre les 23° N et S.

Altitude :

Variable selon localisation. En moyenne, de 200 à 1 000 m.

Biologie, croissance et développement :

Ne supporte pas un trop fort pâturage. Tendance à devenir subéreuse. Une fois établi, très compétitif vis à vis des adventices. Tiges pouvant aller jusqu'à 1 m de haut. Feuilles trifoliées de 15 à 55 mm de long et 7 à 13 mm de large. Le système racinaire est pivotant et peut descendre jusqu'à 90 à 100 cm de profondeur [1] [2]. Après 3 mois, on note 83% des racines dans les 20 premiers cm, puis 11% dans l'horizon 20-40 cm, et 6% de 40 à 100 cm [2].

Sol :

Préfère les textures grossières, bien drainés. Pousse modérément en sols lourds à fort pourcentage d'argiles. Peut tolérer les sols très acides, développe des nodosités à pH 4. Peu tolérant aux excès de salinité.

Eau :

Besoins relevés variables selon géographie. Globalement supérieurs à 500 mm. Bonne tolérance à la sécheresse. Tolère les excès d'eau passagers.

Température et lumière :

Préfère les hautes températures d'été. Craint le gel. Croissance active à partir de 15°C. Tolérance modérée à l'ombrage, mais pousse malgré tout sous cocotiers.

Maladies et ravageurs :

Globalement *Stylosanthes* est l'une des légumineuses tropicales les moins sujettes à maladies. Toutefois, il a été relevé : Anthracnose au Brésil (conditions humides), *Corticium* et *Rhizoctonia solani* au Zaïre (conditions humides), *Diplodia* en Malaisie.

En ravageurs, on a relevé la chenille *Lamprosema diemenalis*. Des nématodes de *Meloidogyne* ont été relevés sur racines, toutefois en parallèle, on recommande au Nigéria d'utiliser *Stylosanthes* en rotation de culture puisqu'il n'est attaqué par aucun nématode des cultures locales.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Bonne compatibilité avec *Panicum maximum* (elle-même agressive en été), *Hyparrhenia rufa*, *Digitaria decumbens*, *Pennisetum clandestinum* et *Paspalum dilitatum*. Quelques réussites avec des *Brachiaria*, qui se révèlent compétitives dans la majorité des cas (par effet d'ombrage).

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Godefroy, J (1988). Observations de l'enracinement du stylosanthes, de la crotalaire et du flemingia dans un sol volcanique du Cameroun – Fruits, Vol. 43, n°2, pp 79-86.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Stylosanthes_guianensis_var._guianensis.htm

Conclusion : « + » mais préférence pour *Stylosanthes hamata* 'Verano'.

Fabacées

42. *Stylosanthes hamata*

Présence en Guadeloupe :

Oui

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre 12 et 28°. Essentiellement dans les Caraïbes.

Altitude :

Essentiellement basse altitude, plante maritime.

Biologie, croissance et développement :

Plante annuelle ou semi-pérenne herbacée à port semi-érigé. La plante peut atteindre les 0,75 m de haut. L'installation dans le milieu est aisée. Supporte une forte pression de pâturage ou de coupe. Bonne aptitude à la compétition avec les adventices graminées. Levée, croissance et développement très hétérogène et conduite comme plante de couverture difficile (Pascal Marnotte, com. pers. – Cirad de la Réunion).

Sol :

Sols infertiles, acides, à tendance sableuse. La variété 'Verano' possède toutefois une classe de texture plus large allant des sables grossiers aux argiles lourdes, et étant également plus tolérante à la sécheresse.

Eau :

Besoin de 600 à 1 700 mm par an avec pour optimum 700 à 900 mm. L'espèce réclame une saison sèche prononcée pour une croissance optimum. Par conséquent, tolérante à la sécheresse.

Température et lumière :

Températures conséquentes (sans plus de précisions).

Maladies et ravageurs :

Résistant à l'anthracnose, et parfois sensible au *Botrytis cinerea* dans le cas de fortes précipitations, ainsi qu' à *Rhizoctonia* sp.

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Peut s'associer facilement avec des graminées, même si celle-ci dépassent légèrement *Stylosanthes*, en raison d'une certaine tolérance à l'ombrage.

Références bibliographiques :

- Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Premiers résultats décevants. Levée capricieuse et difficulté à obtenir un couvert dense. Tolérance à la sécheresse à démontrer encore car croissance et développement faible et hétérogène. En attente des observations en saison humide, mais d'autres plantes ont d'ores et déjà donné de bien meilleurs résultats.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Stylosanthes_hamata.htm

Conclusion : « ++ ». En essai. PdC classique d'après la biblio. Doit faire ses preuves dans notre écologie.

Fabacées

43. *Tephrosia cinerea*

Présence en Guadeloupe :

Oui, assez commune [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 100 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Pas de données Lexsys ni FAO sur cette essence de *Tephrosia*.

Herbe + ou – suffrutescente, à tiges + ou – couchées, hauteur jusqu'à 60 cm.. Utilisée comme pour enivrer et endormir les poissons en pêche de rivière. Présente sur littoral sableux, mornes et falaises calcaires [1].
Doute sur le caractère potentiellement dangereux de la plante.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.



Source : <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/tephrosia-cinerea/fichas/pagina1.htm>

Conclusion : Difficile d'apprécier, la plante reste à trouver. Le pouvoir couvrant semble assez limité.

44. *Tephrosia senna*

Présence en Guadeloupe :

Rare, communément appelée « digo mawon », « endigo mawon » [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Grandes Antilles, Nord de l'Amérique du Sud [1].

Altitude :

0 à 50 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne de 30 à 50 cm de haut, herbacée ou suffrutescente, un peu ligneuse à la base et très ramifiée. Se trouve sur le littoral et plus rarement dans les savanes [1]. Cette essence ne semble pas avoir été déjà utilisée comme plante de couverture. Toutefois, d'autres espèces du même genre l'ont déjà été [2] [3].

Parmi une recherche de plantes de couverture potentielles en vergers guinéens, *Tephrosia candida*, *Tephrosia erembergiana* et *Tephrosia vogelii* ont été référencées comme plantes à port érigé donnant satisfaction [5].

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Tephrosia candida a un effet biocide sur les larves et les adultes de *Diaprepes abbreviatus* [4].

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [4] Lapointe et al. (2003). Toxicity and repellency of *Tephrosia candida* to larval and adult *Diaprepes* root weevil (Coleoptera : Curculionidae). Journal of Economic entomology 96 (3) : 811-816.
- [5] Antichan (1952). Les plantes de couverture dans la protection du sol en verger guinéen. Fruits 7 (7) : 339-341.

Pas de photos disponibles

Conclusion : « - ». Très rare, de plus cette espèce littorale et de savane peut elle passer au champ ?

Commelinacées

45. *Tripogandra serrulata*

Présence en Guadeloupe :

Oui mais très rare. Nom commun Kiraj rivyè (curage rivière) [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Herbe vivace par ses stolons, + ou – rampant et radicaux à la base [1]. Anaya [2] cite un article traitant de l'usage de Commelinacées dont *Tripogandra serrulata* comme couverture de sol installée et laissée en extensif sous caféiers (Coatepec, Veracruz – Mexique). Ces Commelinacées ont un effet allélopathique sur les adventices, notamment sur *Bidens pilosa* et *Mimosa pudica*.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Anaya A.L. (1999). Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems. Critical reviews in Plant Sciences.



Source : <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/commelinaceae/tripogandra-serrulata/fichas/pagina1.htm>

Conclusion : Pas adapté aux vergers guadeloupéens mais incontournable comme PdC et donc à faire figurer en fiche plante de couverture.

Poacées

46. *Tripsacum laxum*

Présence en Guadeloupe :

Oui mais très rare [2]. Nom vernaculaire, « Guatemala grass ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne à chaume érigé. Hauteur de 2 à 3 m.

Sol :

Sols riches. Peut tolérer l'acidité et l'aluminium

Eau :

Zones humides. Peu de tolérance à la sécheresse et aucune vis-à-vis des inondations.

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [2] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 2. 1324 p.



Source : <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gallery/pictures/tripsacuman.htm>

Conclusion : Non retenu car de développement trop important.

Fabacées

47. *Vicia hirsuta*

Présence en Guadeloupe :

Oui, mais sa présence semble toutefois assez rare. Communément appelé « vesce hérissée » (nom métropolitain).

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Originaire de l'Ancien Monde, sans plus de précisions.

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Hauteur de 20 à 40 cm. Ecologie non connue.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.



Source : http://de.wikipedia.org/wiki/Rauhaarige_Wicke; <http://www.kulak.ac.be/facult/wet/biologie/pb/kulakb...>

Conclusion : « ++ ? ». La plante reste à trouver en pleine nature et manque d'infos sur le végétal.

48. *Vigna hosei*

Présence en Guadeloupe :

Oui très commune.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Dans toutes les tropiques humides [3].

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Plante rampante et grimpante. Rudérale et arvale [1] [2]. Formant souvent une couverture du sol épaisse [3]. Besoin d'une humidité conséquente. Au moins 2 500 mm annuels [3]. Stéhlé classe cette plante dans la catégorie « Légumineuses exotiques adaptées convenant comme engrais verts, plantes de couverture et plantes anti-érosion » et confirme que la plante a besoin d'un climat frais et humide sous peine de disparaître épisodiquement en Carême [4]. En effet, on observe cette plante à Vieux-Habitants pendant l'hivernage et disparaît en cours de Carême.

Sol :

Sables limoneux à argiles sableuses et dans l'ensemble un large spectre de sols [2] [3]. Préfère des sols acides autour d'un pH de 5 [3].

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>
- [4] Stéhlé (1965). Les graminées et légumineuses d'intérêt fourrager à la station d'amélioration des plantes au centre des Antilles françaises. Qualitas plantarum et materiae vegetabiles 12 (1) : 48-58.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Non installée pour étude sur la station mais observée ça et là, en conditions légèrement fraîches. Pourrait être intéressante mais des plantes de comportement analogue donnent de meilleurs résultats (elle ressemble beaucoup à *Neonotonia wightii* et *Macroptilium atropurpureum*). Sa volubilité et sa plus grande sensibilité à la sécheresse dissuadent de l'utiliser. Mais pourquoi pour d'autres cultures que des vergers en côte sous le vent.

Pas de photos disponibles

Conclusion : « + ». Un peu volubile et à positionner en climat à sécheresse modérée. Plante non prioritaire / à d'autres marchant mieux.

Fabacées

49. *Vigna luteola*

Présence en Guadeloupe :

Oui commune [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 500 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Liane rampante ou grimpante ou herbe traçante. Rudérale et arvale des sols frais ou humides : abords de rivières, sols plats, bas-fonds, talus en région bien arrosée [1]. Serait annuelle à semi pérenne. Adaptée aux sols pauvres, spécialement argileux mais s'adapte très bien à un large spectre de texture. [2]. Stéhlé classe cette plante dans la catégorie « Légumineuses exotiques adaptées convenant comme engrais verts, plantes de couverture et plantes anti-érosion » [3].

Sol :

Eau :

Sensible à la sécheresse, besoins en eau annuels de 1 500 à 3 000 mm [2].

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Logiciel et base de données Lexsys – School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales Bangor, UK – lexsys@bangor.ac.uk (mars 2006).
- [3] Stéhlé (1965). Les graminées et légumineuses d'intérêt fourrager à la station d'amélioration des plantes au centre des Antilles françaises. Qualitas plantarum et materiae vegetabiles 12 (1) : 48-58.

Des graines ont été collectées dans la nature. N'ont pas été testées en station. Observée par ailleurs en friche urbaine en Dominique, couverture intéressante, quelques plantes passent à travers cependant.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Vigna_luteola.htm

Conclusion : Plante intéressante mais non adaptée aux climats secs. A envisager pour des essais en climat plus humide.

Fabacées

50. *Vigna unguiculata*

Présence en Guadeloupe :

Oui. Nom commun : nyébé en Afrique et Pwa kann en Guadeloupe.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Entre 30°N et S. Présent dans toutes les zones tropicales et la plupart des zones subtropicales.

Altitude :

Plutôt une plante de basse altitude mais peut pousser sans problème jusqu' à 1 500 m d'altitude.

Biologie, croissance et développement :

Plante herbacée annuelle à port variable selon accessions (érigé, rampant à volubile). Les feuilles sont trifoliées avec un pétiole de 2,5 à 12,5 cm. La foliole centrale mesure de 2,5 à 12 cm. La gousse mesure de 10 à 23 cm. La dimension que la plante peut atteindre n'est pas précisée, toutefois les dimensions référencées ci-dessus donne un ordre d'idée. Croissance rapide. Colonise mal le milieu si le terrain n'a pas été préparé. Eviter un pâturage ou une intervention de coupe trop importante. Très compétitif vis à vis des adventices à croissance et hauteur modérées [1]. Grain alimentaire fort prisé en marché local en Guadeloupe.

Sol :

Adaptée à un large spectre de textures allant des sables aux argiles lourdes mais bien drainées, ainsi qu'à un large éventail de pH (de préférence légèrement acide à légèrement alcalin). Peu tolérante aux fortes salinités. Rôle actif dans l'installation d'une bonne fertilité du sol.

Eau :

Besoin de 750 à 1 100 mm par an. Tolérante à la sécheresse (l'une des meilleures parmi les Fabacées). Intolérance totale aux excès d'eau.

Température et lumière :

Préfère les conditions chaudes et humides. Optimum de température autour de 27°C.

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Vigna est habituellement utilisée seule. Elle n'est pas compétitive vis à vis des graminées pérenne, puisqu'elle même est une annuelle.

Références bibliographiques :

- [1] Fiches FAO plantes fourragères et de couvertures
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/mainmenu.htm>

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Très décevant avec l'accession récupérée pour les essais ici. Celle-ci s'est révélée peu couvrante de part son port (éventuellement agir sur la densité) et avec un cycle de 2 à 3 mois à peine. Toutefois, la richesse en accessions (sous-espèces et variétés) existantes et avec forte variabilité de ports (érigé, rampant à volubile) et comportement doit amener à poursuivre la prospection en matériel végétal existant (Caraïbe et surtout Afrique). Car il existe un potentiel à utiliser cette plante en association pour vente des pois en marché local alimentaire. Le pois est assez prisé localement. Une botte de 300 g de gousses se négocie à 2 euros.



Source : http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Vigna_unguiculata.htm

Conclusion : Premiers résultats mènent à son abandon. Mais son extrême diversité variétale doit pousser à enquêter davantage sur les différentes accessions présentes de par le monde d'autant plus que son potentiel de vente comme grain alimentaire en marché local est important.

Astéracées

51. Wedelia trilobata

Présence en Guadeloupe :

Oui, très commune [1]. Nom commun Pat a kanna (patte à canard), Zèb solèy.

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

Biologie, croissance et développement :

Herbe + ou – suffrutescente, rampante et radicante. Prairiale et rudérale, très ubiquiste. Probable qu'il existe des écotypes : du très sec au très humide [1].

Citée comme plante de couverture potentielle en culture de palmier du fait qu'elle n'est pas hôte de *Myndus crudus*, insecte vecteur du jaunissement mortel des palmiers [2].

Fournet la cite comme plante de couverture en usage courant ou aménagement paysager en uintroductio

à son ouvrage sur les mauvaises herbes des petites Antilles [3].
Un article en provenance des îles Fidji prévient du caractère invasif de cette plante dans le Pacifique, utilisée de plus en plus comme plante couvrante ornementale et possédant une adaptabilité écologique hors du commun [4].

Pascal Marnotte (com. pers.) du Cirad de la Réunion rapporte d'un caractère allélopathique de cette plante souvent référencé dans la bibliographie.

Sol :

Très ubiquiste [1].

Eau :

Très ubiquiste [1].

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Howard (1999). Evaluation of dicotyledonous herbaceous plants as hosts of *Myndus crudis* (Homoptera : Auchenorrhyncha : Cixiidae). Plantations, recherche, développement 6 (2) : 95-101.
- [3] Fournet & Hammerton (1991). Mauvaises herbes des petites Antilles. Ed. Inra – Techniques et pratiques, 214 p.
- [4] Thaman (1999). *Wedelia trilobata* : Daisy invader of the Pacific Islands. IAS Technical Report 99/2. University of the South Pacific, Suva, Fiji Islands.

Essence étudiée à Vieux-Habitants - Résultats :

Etudiée en carré en station. Caractère ubiquiste et capacité d'adaptation surprenante. La reprise par boutures racinées fonctionne. La colonisation de l'espace est toutefois lente et laisse un temps certain aux adventices de coloniser le milieu. Les premiers résultats ne sont donc pas très convaincants, d'autant plus qu'un fort pouvoir allélopathique est redouté avec cette plante. A suivre et doit faire ses preuves.



Conclusion : Résultats mitigés. Abandon probable.



Commelinacées

52. *Zebrina* sp.

Présence en Guadeloupe :

Seule *Zebrina pendula* est présente en Guadeloupe, et assez commune. Nom commun « Misère » [1].

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 800 m [1].

Biologie, croissance et développement :

Herbe prostrée-rampante, pendante à plus ou moins ascendante. Aptitude au bouturage spontané [1].

Anaya [2] cite un article traitant de l'usage de Commelinacées dont *Zebrina* sp. comme couverture de sol installée et laissée en extensif sous caféiers (Coatepec, Veracruz – Mexique). Ces Commelinacées ont un effet allélopathique sur les adventices, notamment sur *Bidens pilosa* et *Mimosa pudica*.

Sol :

Eau :

Préciser son comportement vis-à-vis de l'eau car semble plus ou moins résister à la sécheresse s'il n'y a pas trop de soleil direct (rencontrée notamment en milieu forestier xérophile en côte sous le vent).

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- [1] Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. 2538 p.
- [2] Anaya A.L. (1999). Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems. Critical reviews in Plant Sciences.



Sources : <http://www.plantoftheweek.org/week280.shtml>

Conclusion : Pas adapté aux vergers guadeloupéens mais à faire figurer en fiche plante de couverture puisque utilisable en climat très humide.

Fabacées

53. *Zornia microphylla*

Présence en Guadeloupe :

Oui mais présence assez rare toutefois. Nom vernaculaire, « zèb kabrit », « zèb mouton », « tenn », « trèf ».

Latitudes (NB Guadeloupe : 16° N) :

Altitude :

0 à 500 m.

Biologie, croissance et développement :

Plante pérenne dont les tiges couchées, très ramifiées et glabres atteignent une longueur maximum de 40 cm. La floraison a lieu presque toute l'année. Se trouve dans les savanes sèches ou plus ou moins humides.

Sol :

Eau :

Température et lumière :

Maladies et ravageurs :

Compatibilité avec d'autres Pl. Couv. :

Références bibliographiques :

- Fournet, J. (2002). Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1. 1324 p.

Pas de photos disponibles pour l'espèce, à défaut :



Zornia alabra (d'après http://www.tronicalforaes.info/kev/Foraes/Media/Html/Zornia_alabra.htm)



Zornia latifolia (d'après http://www.tronicalforaes.info/kev/Foraes/Media/Html/Zornia_latifolia.htm)

Conclusion : « + et ? ». Suscite l'intérêt mais le végétal reste introuvable. Poursuivre l'investigation en infos et végétal (commerce ou pleine nature).

RECONCEPTION ET EVALUATION DES SYSTEMES DE CULTURE

LE CAS DE LA GESTION DE L'ENHERBEMENT EN VERGERS D'AGRUMES

EN GUADELOUPE

Résumé

Les objectifs de développement de systèmes de culture durables imposent aux acteurs du développement rural une conception (ou reconception) et une évaluation de ces systèmes. Le prototypage peut être une méthodologie efficace de conception. Cependant, cette méthode conduit souvent les chercheurs à être seuls concepteurs alors que parallèlement l'appropriation des innovations dépend fortement de l'implication des autres acteurs dans les différentes étapes de conception et d'évaluation des nouveaux systèmes. En réponse, des approches participatives sont de plus en plus fréquentes pour pallier à cette difficulté d'appropriation tandis qu'une évaluation multicritère apporte une réponse aux objectifs d'évaluation de la durabilité des systèmes. La méthode développée dans cette thèse -nommée DISCS pour 're-Design and assessment of Innovative Sustainable Cropping Systems' – met en œuvre un processus de reconception des systèmes de culture par une approche participative tout en développant des outils d'évaluation multicritère spécifiques à chaque catégorie d'acteurs impliqués. La méthode DISCS s'inscrit tout de même dans la lignée de la méthodologie du prototypage mais se différencie par une démarche itérative à trois échelles d'étude (parcelle expérimentale, exploitation agricole et territoire) afin de s'assurer que les innovations et les critères d'évaluation répondent bien aux attentes des acteurs. A chaque étape du processus de reconception une évaluation est réalisée à l'aide d'un jeu d'indicateurs et ce aux trois échelles d'étude. DISCS a été testée sur le système de culture agrumicole en Guadeloupe (Antilles Françaises) dans un but de réduire l'utilisation des pesticides. Cinq prototypes de gestion de l'enherbement ont été conçus collectivement puis testés sur une station expérimentale selon les principes d'une approche systémique et évalués à l'aide d'indicateurs. Nous montrons dans ce travail que des systèmes de culture innovants peuvent être les produits d'une co-conception entre les producteurs et les chercheurs. DISCS permet aussi de définir explicitement le rôle de tous les différents acteurs impliqués dans le processus de reconception du système de culture. DISCS est particulièrement adaptée à la reconception des systèmes de culture pérenne notamment grâce à son processus d'amélioration pas à pas et itératif. Les outils d'évaluation multicritère développés, et notamment les indicateurs, permettent quant à eux de fournir des outils d'aide à la décision directement utilisables par les acteurs assurant ainsi un lien étroit entre la recherche et le développement. Dans cette thèse, nous présentons les premières étapes de reconception du système agrumicole guadeloupéen basée sur la méthode DISCS, à savoir du diagnostic initial pour identifier les objectifs d'amélioration du système en collaboration avec les acteurs, jusqu'à l'évaluation multicritère des prototypes de gestion de l'enherbement basée sur un jeu d'indicateurs approprié. Notre travail nous permet aujourd'hui de recommander des techniques de gestion de l'enherbement en jeunes vergers d'agrumes répondant aux contraintes actuelles de développement de systèmes de culture durable.

Mots clés : approche participative, innovation agricole, durabilité, pratiques culturelles, analyse multicritère, indicateurs, herbicides, gestion de l'enherbement, citrus, plantes de couverture, services écologiques.

RE-DESIGNING AND ASSESSING THE CROPPING SYSTEMS

THE CASE OF WEED MANAGEMENT IN CITRUS ORCHARDS IN

GUADELOUPE

Summary

Re-designing and assessing sustainable cropping systems has become a major challenge for agricultural researchers and farmers. In most prototyping methods, researchers are the main, or sometimes the only designers. However, more and more attempts for involving different kinds of stakeholders in participatory approaches have been accounted for. Besides, multi-criteria assessment tools are generally accepted as the solution to evaluating the overall sustainability of new cropping systems. The new method described in this thesis (DISCS for 're-Design and assessment of Innovative Sustainable Cropping Systems') implements a participatory re-designing process, while developing at the same time specific multi-criteria assessment tools for each category of stakeholders involved. Though founded on the common structure of prototyping methods, this five-step-method differs first by implementing three progress loops, at experimental field, farm then regional scale. Besides, an ongoing progress dynamic is set between research at the experimental station and crop management in farms, in order to ensure that innovative techniques actually match the farmers' expectations. Assessment at each step is performed using a scale-specific set of indicators. The DISCS method was tested on citrus production in Guadeloupe (French West Indies), to develop lower-pesticide sustainable cropping systems. Five weed management prototypes were collectively designed then tested at an experimental station based on the principles of a systematic approach. We show here that, contrary to other prototyping methods, innovative cropping systems can be the product of a farmer-researcher collaborative design. It was also verified that the innovation process benefited from involving non-agricultural stakeholders in the definition of the objectives for sustainable cropping systems. Such step by step improvement is well suited to perennial cropping systems. Using the DISCS framework should enable stakeholders to target precisely the decision-aid tools that need to be designed for a specific issue, thus ensuring a direct link between research and application. In this thesis, we present the first stages of citrus cropping system redesigning based on DISCS method; namely from the initial diagnosis, for to identify targets for improvement of the cropping system in collaboration with the stakeholders, to the multi-criteria assessment of weed management prototypes based on a set of appropriate indicators. Our work enables us to recommend sustainable weed management techniques for young orchards that correspond to the current constraints facing orchards in Guadeloupe.

Key words: participatory approach, agricultural innovation, sustainability, cropping practices, multi-criteria assessment, indicators, herbicides, weed management, citrus, cover crop, ecological services.