



Analyse des conflits et synergies entre services écosystémiques multiples en vergers de pommiers

Constance Demestihias

► To cite this version:

Constance Demestihias. Analyse des conflits et synergies entre services écosystémiques multiples en vergers de pommiers. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2017. Français. <NNT : 2017AVIG0690>. <tel-01704580>

HAL Id: tel-01704580

<https://theses.hal.science/tel-01704580v1>

Submitted on 8 Feb 2018

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

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



HAL Authorization



Thèse de doctorat

Présentée par

Constance Demestih

Ecole doctorale : Sciences et Agrosociétés (ED 536)
Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse

Analyse des conflits et synergies entre services écosystémiques multiples en vergers de pommiers

En prévision d'une soutenance le 23 février 2017

Jury :

Mme Alexia Stokes, Directrice de Recherche, Inra
Mme Muriel Valantin Morison, Chargée de recherche, Inra
M. François Mesléard, Directeur de recherche, UAPV
M. Jean-Luc Régnard, Professeur à Montpellier SupAgro
Mme Christiane Raynal, Direction Scientifique et Technique
Fruits et Légumes, Ctifl Lanxade
M. Daniel Plénet, Ingénieur de Recherche, Inra
Mme Françoise Lescouret, Directrice de Recherche, Inra

Rapporteuse
Rapporteuse
Examineur
Examineur

Examinatrice
Encadrant
Directrice de thèse

« L'autonomie – la vraie liberté – est l'autolimitation nécessaire non seulement dans les règles de conduite intrasociale, mais dans les règles que nous adoptons dans notre conduite à l'égard de l'environnement ».

Cornelius Castoriadis, 2005. Une société à la dérive.

REMERCIEMENTS

Pendant ces trois années, j'ai été entourée de plusieurs personnes qui ont pleinement contribué à la réalisation de ces travaux de recherche. Je souhaiterais remercier chacun d'eux pour leur implication, leur patience, leur confiance, leur aide, leur soutien. Ils ont tous, de leur façon, apporté une pierre à l'édifice qu'est cette thèse.

Je voudrais d'abord sincèrement remercier mes trois encadrant à l'INRA. Je remercie Françoise, ma directrice de thèse, de m'avoir guidé dans ma démarche scientifique et de m'avoir fourni de très nombreux et précieux conseils en matière d'écriture scientifique et de rigueur. Merci à Daniel de m'avoir fait confiance pendant ces trois années, de m'avoir initié au travail de terrain et à la rigueur des mesures, mais d'abord et avant tout, de m'avoir transféré quotidiennement sa passion pour l'agronomie. Enfin, je remercie Michel pour sa disponibilité et ses conseils en analyse de données. La complémentarité de vos connaissances m'a permis de mener à bien ces travaux. Un grand merci.

Je remercie le CTIFL et le dispositif CIFRE - Conventions Industrielles de Formation par la Recherche - qui m'ont permis de réaliser cette thèse en la finançant ainsi que le programme Casdar N-Pérennes qui a permis de financer les coûts analytiques pour établir les cinétiques de carbone et d'azote sur différents systèmes de vergers de pommiers.

Au CTIFL, je remercie Dominique Grasselly, Christiane Raynal et Yann Bintein. Merci également à Jean-Michel Ricard, qui sans être impliqué directement dans ce travail, m'a beaucoup soutenue. Enfin, je remercie les collègues de Saint-Rémy et Balandran qui m'ont toujours accueilli très chaleureusement.

Je remercie les membres de mon comité de thèse : Nicolas Beaudoin, Christian Gary, Laurent Philippot et Sylvaine Simon qui ont vu cette thèse se transformer et m'ont apporté beaucoup de conseils, sur différents points, pendant ces trois années.

Les remerciements vont ensuite très certainement à ma précieuse équipe STICS avec qui j'ai pu travailler pendant de longues heures et qui a toujours pris le temps de me répondre (merci le Forum !). Un merci très particulier à Iñaki, Marie et Domi à Avignon qui en plus de leur soutien sur le modèle, ont été un réel soutien moral par leur bonne humeur et leur écoute.

A Gotheron, je voudrais vivement remercier Sylvaine, qui en plus de me fournir toutes les informations nécessaires, m'a également beaucoup appuyé et aiguillé dans mon travail. Merci

également à Solène Borne d'avoir facilité ma recherche de données expé ainsi que Claude Bussi. Un grand merci enfin à toute l'équipe technique pour son aide sur le terrain.

Un immense merci à Marie Charreyron pour toutes les infos fournies sur le site de La Pugère et pour son aide sur le terrain.

Je voudrais également remercier Nicolas Wallet-Errani, mon stagiaire M2, qui a permis de mettre en place IPSIM-Pommier. Merci à Marie-Hélène Robin pour son aide autour d'IPSIM ainsi que Jean-Noël Aubertot. Un très grand merci à tous les experts qui ont contribué à la conception du modèle : Pascal Borioli, Sylvaine Simon, François Warlop, Jean-Charles Bouvier, Pierre Frank, Claire Lavigne, Jean-Michel Ricard, Laurent Brun, Yvan Capowiez, Jean-François Debras, Jean-François Toubon, Franziska Zavagli.

Merci à Laurent Philippot pour son accueil à l'UMR Agroécologie de Dijon ainsi que Marie-Christine Breuil qui m'a initié aux mesures de labo sur le sol.

Merci à Mohamed Memmah et Pierre Valsésia pour toute leur aide autour de R et de la modélisation.

Sur un plan plus personnel

Je voudrais dans un premier temps remercier deux personnes qui ont joué un rôle important dans le déploiement de cette thèse : Marine Guadagnini a vécu ma thèse au jour le jour et je voudrais sincèrement la remercier pour sa belle amitié, son soutien aussi bien moral que pratique, sa patience, sa présence. Je remercie également Frédéric Bouvery pour son immense appui sur le terrain et son humour incomparable.

Merci à Gaëlle Marliac que j'ai eu la chance de rencontrer à PSH et qui a continué à me soutenir même après son départ d'Avignon, à Anna-Lena Herbig qui a été un appui important pendant ces trois années avec ces grandes discussions autour de bonnes bières et merci à toutes les belles personnes que j'ai croisé au cours de ces trois années : Eva, Clarisse, Mitra, Fatima, Anne-Laure, Aurélie, Refka, Tarek, Kiki, Alejandro, Guillaume, Emilie, Doriane, Patricia, Virginie, Emily.

Un merci très particulier à Faten Amari, qui me comprend dans ma binationalité.

Les remerciements vont aussi à mes amies d'enfance à Athènes, « ta koritsia » : Cerise, Elena, Ioanna, Georgia, Emilie, Markella, Ioanna N. pour leur soutien, leur folie, leur gaieté et encore pleins d'autres choses depuis tant d'années.

Un merci très particulier à mes parents, à mon frère Nico et à ma sœur Marie, pour leur appui et leur réconfort, chacun à sa manière, malgré la distance et les décalages horaires fastidieux pour s'appeler.

Enfin et surtout : merci à mon Dimitri, qui était là pour me retenir chaque fois que je perdais l'équilibre.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	5
Table des matières	9
Table des illustrations	15
INTRODUCTION	21
1. LA NOTION DE « SERVICE ECOYSTEMIQUE »	23
2. LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES DANS LE CADRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA POMICULTURE	24
2.1. <i>La notion d'agroécosystème</i>	24
2.2. <i>Les particularités du verger de pommiers</i>	25
3. OBJECTIFS DE LA THESE ET DEMARCHE GLOBALE	26
4. ARCHITECTURE DU MEMOIRE DE THESE	29
5. PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES	30
CHAPITRE 1: Que sait-on sur les services écosystémiques en vergers ?	33
ABSTRACT	35
1. INTRODUCTION	37
2. ECOSYSTEM SERVICES IN COMMERCIAL ORCHARDS	40
2.1 <i>Provisioning service: fruit production in terms of quantity and quality</i>	42
2.1.1 Organogenesis	42
2.1.2 Light interception, carbon assimilation and allocation	43
2.1.3 Water and nitrogen effects	44
2.2 <i>Regulation and maintenance services</i>	48
2.2.1 Climate regulation: mitigation of greenhouse gas emissions	48
2.2.2 Soil nitrogen availability	51
2.2.3 Water regulation : hydrological cycle and water flow maintenance	52
2.2.4 Pest and disease control	54
2.2.5 Lifecycle maintenance: pollination	58
3. ASSESSING AND ANALYZING MULTIPLE ECOSYSTEM SERVICES IN ORCHARDS	59
3.1 <i>Using models to quantify indicators of ecosystem services and their connections</i>	60
3.2 <i>Analyzing multiple ecosystem service relationships</i>	61
4. CONCLUSIONS	62
ACKNOWLEDGEMENTS	64
CHAPITRE 2 : Matériels et Méthodes	65
1. CHOIX DES INDICATEURS DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET DE FONCTIONS ECOSYSTEMIQUES	67

1.1.	<i>Indicateurs de services écosystémiques</i>	67
1.1.1	Disponibilité de l'azote dans le sol.....	67
1.1.2	Régulation du climat	68
1.1.3	Cycle de l'eau et maintenance des flux hydriques.....	68
1.1.4	Production de fruits	68
1.1.5	Contrôle des bioagresseurs	69
1.1.6	Prévention de nuisances environnementales dues aux pesticides.....	69
1.2	<i>Indicateurs de fonctions écosystémiques</i>	70
2	DESCRIPTION DES DEUX MODELES UTILISES POUR LA SIMULATION DES INDICATEURS DE SERVICES ET DE FONCTIONS ECOSYSTEMIQUES	72
2.1	<i>STICS</i>	72
2.2	<i>IPSIM</i>	74
3	LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET LES SYSTEMES DE CULTURE ETUDIES	75
3.1	<i>Description de l'essai système « bas intrants » du site expérimental La Pugère</i>	76
3.1.1	Contexte agronomique et expérimental.....	76
3.1.2	Contexte pédologique.....	80
3.1.3	Contexte climatique.....	80
3.2	<i>Description du dispositif 'Bioreco' de l'INRA de Gothenon</i>	80
3.2.1	Contexte agronomique et expérimental.....	80
3.2.2	Contexte pédologique.....	82
3.2.3	Contexte climatique.....	83
4	MESURES EXPERIMENTALES	83
4.1	<i>Données correspondant aux variables d'entrées des modèles</i>	84
4.2	<i>Données correspondant aux variables permettant de paramétrer et d'évaluer le modèle</i>	84
4.3	<i>Données supplémentaires</i>	84
CHAPITRE 3 : Analyse des services écosystémiques en verger de pommiers à l'aide du modèle STICS		87
ABSTRACT		89
1.	INTRODUCTION.....	91
2.	MODEL PRESENTATION	92
2.1	<i>General outline</i>	92
2.2	<i>The studied agricultural practices</i>	95
3.	MATERIALS AND METHODS	95
3.1	<i>Experimental data</i>	95
3.1.1	Experimental sites.....	95
3.1.2	Field data collection.....	98
3.2	<i>STICS parameterization for apple orchards</i>	99
3.2.1	Parametric curves	99

3.2.2	Global estimation.....	100
3.3	<i>Initialization and input data</i>	100
3.4	<i>Model evaluation</i>	101
3.5	<i>Ecosystem services and functions indicators and analysis</i>	101
4.	RESULTS.....	103
4.1	<i>Model parameterization and evaluation</i>	103
4.2	<i>Analysis of ecosystem services</i>	107
4.2.1	Values and correlations of ecosystem service indicators	107
4.2.2	Correlations between ecosystem service and ecosystem function indicators	112
4.2.3	Impact of pedoclimatic conditions and agricultural practices on ecosystem functions	114
4.2.4	Linking pedoclimatic conditions and agricultural practices to ecosystem service profiles	116
5.	DISCUSSION	118
5.1	<i>Adaptation of the STICS model to apple orchards</i>	118
5.2	<i>Analyzing the impact of pedoclimatic conditions and agricultural practices on ecosystem services..</i>	119
6.	CONCLUSIONS	121
	ACKNOWLEDGMENTS	121
	CHAPITRE 4 : IPSIM-Pommier	123
	RESUME.....	125
1.	INTRODUCTION.....	127
2.	MATERIELS ET METHODES.....	128
2.1.	<i>Description des trois bioagresseurs étudiés</i>	128
2.1.1.	Carpocapse	128
2.1.2.	Puceron cendré	129
2.1.3.	Tavelure	130
2.2.	<i>Principes généraux d'IPSIM</i>	131
2.3.	<i>Structure du modèle</i>	132
2.4.	<i>Démarche générale de conception et d'évaluation du modèle</i>	136
2.5.	<i>Conception détaillée du modèle</i>	138
2.5.1.	Création de l'arbre de décision	138
2.5.2.	Le choix des attributs et leur emplacement dans l'arbre de décision.....	140
2.5.3.	Le choix des échelles	143
2.5.4.	Règles de décision pour l'agrégation des attributs	143
2.5.5.	Interactions entre les choix d'attributs, leurs échelles et leurs agrégations.....	146
2.6.	<i>Evaluation des systèmes pour le contrôle global des bioagresseurs</i>	148
2.7.	<i>Simulation des dégâts des trois bioagresseurs étudiés et évaluation du modèle</i>	148
2.7.1.	Variables d'entrée	148

2.7.2.	Evaluation de la qualité d'ajustement du modèle.....	149
3.	RESULTATS	149
3.1.	<i>Structure finale de l'arbre décisionnel du modèle</i>	149
3.2.	<i>Sorties du modèle et qualité d'ajustement</i>	151
4.	DISCUSSION	155
4.1.	<i>Validité d'IPSIM-Pommier</i>	155
4.2.	<i>Intérêt de la conception d'IPSIM-Pommier</i>	155
4.3.	<i>Les limites du modèle</i>	156
5.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	157
CHAPITRE 5 : Analyse des conflits et synergies entre services écosystémiques multiples en systèmes de culture fictifs		159
ABSTRACT		161
1.	INTRODUCTION.....	163
2.	MATERIALS AND METHODS	164
2.1.	<i>General approach</i>	164
2.2.	<i>Ecosystem service and ecosystem function indicators</i>	165
2.3.	<i>Models</i>	168
2.4.	<i>Designing virtual apple orchard cropping systems</i>	170
2.4.1.	Combination of agricultural practices modalities and sampling of apple orchard cropping systems	170
2.4.2.	Biotic and abiotic environment	172
2.5.	<i>Data analyses</i>	172
3.	RESULTS.....	174
3.1.	<i>Agricultural practices heterogeneously impact ecosystem functions</i>	174
3.1.1.	Nitrogen and water related functions	174
3.1.2.	Pest control related functions	175
3.2.	<i>Ecosystem services patterns of correlations are explained by ecosystem functions</i>	178
3.2.1	Synergies.....	178
3.2.2	Conflicts	179
3.3	<i>Typology of apple orchard cropping systems: the conflict between marketed and non-marketed ecosystem services as a backbone</i>	182
4	DISCUSSION AND CONCLUSIONS	187
5.1.	<i>Main achievements</i>	187
5.2.	<i>Methodological limits</i>	188
5.2.1.	Model limits.....	188
5.2.2.	Which practices are the most relevant to study synergies and conflicts between ecosystem services?	189

4.3	<i>Advantages of our approach</i>	189
CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		191
1.	LA COMPLEXITE DU FONCTIONNEMENT D'UN VERGER DE POMMIERS DECOMPOSEE SOUS L'ANGLE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES	193
1.1.	<i>Originalité de la démarche d'analyse et résultats saillants</i>	193
1.2.	<i>Identification des manques de connaissances sur le fonctionnement du verger de pommiers</i>	195
1.3.	<i>Perspectives d'évolution du cadre d'analyse utilisé dans ce travail de thèse</i>	196
1.3.1.	La question de l'échelle d'espace et de temps.....	196
1.3.2.	Prise en compte de l'ensemble de la chaîne de production de pommes	198
1.3.3.	L'importance du sol et du climat	199
2.	AVANTAGES ET LIMITES DES OUTILS ET METHODES UTILISES POUR ANALYSER LES LIENS ENTRE SERVICES	200
2.1.	<i>Les modèles utilisés</i>	200
2.1.1.	Intérêt de la modélisation	200
2.1.2.	Limites et perspectives d'évolution des modèles utilisés	201
2.2.	<i>Utilisation de la notion de « système technique »</i>	205
2.3.	<i>Représentation des profils de services</i>	205
3.	RECOMPOSER DES LOGIQUES DE GESTION DU VERGER DE POMMIER AVEC COMME OBJECTIF L'OPTIMISATION DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES MULTIPLES	206
3.1	<i>Guider et structurer l'acquisition de nouvelles connaissances agroécologiques</i>	206
3.1.1	Le rôle de la modélisation.....	206
3.1.2	Optimiser la gestion du sol pour améliorer la qualité et la quantité des matières organiques	207
3.1.3	Utiliser la biodiversité planifiée pour réguler les bioagresseurs.....	208
3.2	<i>Co-concevoir des logiques de gestion durable de vergers via la conception assistée par modèles : perspectives de recherche issues du travail de thèse</i>	208
3.2.1	De la notion de conflit entre services à celle d'optimisation multicritère.....	208
3.2.2	Implication des parties prenantes dans l'optimisation multicritère.....	209
Bibliographie		211
Annexes		245
Glossaire		296
Résumé		299
Summary.....		301

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure i-1: Modèle en cascade liant les pratiques agricoles, les composantes physiques, chimiques et biologiques de l'agroécosystème, les fonctions écosystémiques, les services écosystémiques et les bénéfices tires de ces services (adapté de Haines-Young & Potschin, 2009).....	24
Figure i.2 : Démarche globale pour analyser les liens entre services écosystémiques multiples en verger de pommiers. A gauche sont figurées les trois étapes et leurs termes de passage, au milieu est donnée une brève description du travail de modélisation avec les modèles STICS et IPSIM et à droite une description du travail de terrain. Chaque case en jaune fait référence à un chapitre de la thèse.....	28
Figure 1.1 Apple orchard with anti-hail nets on <i>the Golden Delicious cultivar</i> , in <i>southeastern France</i> (photo credits: C. Demestihias).....	37
Figure 1.2: Relationship between agricultural practices, physical and biological structures, functions, services and benefits according to the “cascade model” of Haines-Young and Potschin (2009) in an agroecosystem..	38
Figure 1.3: <i>Opiliones</i> spider (<i>Hadrobunus grandis</i>) on <i>Crimson Crisp®</i> cultivar apple (photo credits: C. Demestihias)	39
Figure 1.4: Linking agricultural management (pink boxes), ecosystem functions (dark green boxes for plant-related functions, orange boxes for soil related functions and gray box for pest- related functions) and ecosystem services (light green boxes) in the orchard agroecosystem. The pink box, ‘Groundcover management’, concerns a wide range of options including legumes, cover crops, grasses, pruning wood and senescent leaves left on the ground, etc. Agricultural management, ecosystem functions and ecosystem services are linked by lines and each color is associated with a function. Soil composition and structure as well as climate (violet boxes) are considered separately from agricultural practices. Soil is impacted by groundcover management as well as weed and pest control. Climate is considered to impact all functions..	41
Figure 2.1: Localisation des deux sites expérimentaux de Gotheron et la Pugère	76
Figure 2.2: Système bas-intrants avec variété résistante à la tavelure (Pu_LISR2014) de la station expérimentale ‘La Pugère’	77
Figure 2.3 : Profil de sol à Gotheron sur le rang et l’interrang du système conventionnel à Gotheron (Got_CON2015).	83
Figure 3.1: Conceptual scheme of the studied functioning system (apple orchard) and how it is represented by the STICS crop-soil model. Ecosystem services (red boxes) are explained by one or several ecosystem functions (yellow boxes), which are impacted by agricultural practices (green boxes). For a given cropping system (i.e. a set of agricultural practices represented by the green boxes), ecosystem functions and services can be simulated by STICS (text in black) for a given set of soil and climate conditions (light brown boxes). Climate inputs are daily inputs.	94

Figure 3.2: Potential fruit growth of the Golden Delicious cultivar. Dots represent observed data and the line represents the adjusted curve.....	104
Figure 3.3: Comparison of observed (x-axis) and simulated (y-axis) leaf area index LAI (A), annual aboveground biomass (B), fruit dry biomass (C) and absorbed nitrogen quantity in aboveground biomass (D) for all pooled cropping systems. rRMSE is the relative mean squared error and Eff the model efficiency. Blue lines are regressions of simulated on observed data. Dotted lines are the first bisectors of simulated and observed data.	105
Figure 3.4: Simulated (lines) and observed (dots) dynamics of LAI, aboveground biomass, dry fruit biomass and nitrogen amounts in aboveground biomass in the 3 studied cropping systems in Gotheron and La Pugère experimental sites.....	107
Figure 3.5: Impacts of pedoclimatic and agricultural practices on ecosystem functions strongly correlated to ecosystem services for the 9 studied cropping systems. On the x-axis, for soil and climate: 1= Pugère 2014, 2= Pugère 2015, 3 = Gotheron 2015. For fertilization: 0 = no input, 1 = organic input, 2 = organo-mineral input, 3 = mineral input.....	115
Figure 3.6: Ecosystem services profiles on radar plots for the 9 studied cropping systems. Ecosystem services are (from the top clockwise): soil organic nitrogen variation (varNorg), mean soil nitrate concentration (meanNO3), C sequestration (Cseques), prevention of N denitrification (N2Oprev), soil humidity for first soil layer (0-30 cm) (meanHum1), drainage, nitrate leaching prevention (waterNO3prev), yield and fresh fruit mass (FruitMass). For each service, values are normalized, i.e. they are relative to the maximal value observed over the 9 studied cropping systems. A value close to zero on the radar plot indicates a low level of service and a value close to 1 a high level of service.	117
Figure 4.1: Carpocapse sur rameaux de pommier sur le site de la Pugère	130
Figure 4.2: Infestation de pucerons cendré et présence de fourmis sur jeunes pousses de pommier sur le site expérimental de Gotheron, mai 2015.....	130
Figure 4.3: Lésions sur feuille dues à la contamination par la tavelure sur le site de Gotheron, 2015	131
Figure 4.4: Schéma explicatif des principales entités de IPSIM sur l'exemple de IPSIM-Pommier. Les trois onglets apparaissent en haut à gauche. L'interface présentée ici permet de visualiser les entités de l'onglet n°1. On retrouve les exemples du tableau 4.1 pour l'attribut 'Conduite du verger'. Les interfaces des onglets 2 et 3 ne sont pas présentées. Les termes illustrant l'échelle se rapportent au contrôle des bioagresseurs (i.e. favorable signifie meilleur contrôle, c'est-à-dire réduction des dégâts)	134
Figure 4.5 : Diagramme méthodologique de la conception et de l'évaluation de la qualité d'ajustement d'IPSIM-Pommier. L'arbre de décision est dans un premier temps décrit par une étude bibliographique puis ajusté par des dires d'experts. Ces données sont transcrites dans le logiciel DEXI. Puis des simulations sont lancées sur la base des itinéraires techniques et conditions des deux dispositifs expérimentaux en 2014 et	

2015. Enfin les résultats du modèle sont comparés aux observations de dégâts, à la récolte pour le carpocapse et la tavelure et au pic de vol mi-mai du puceron cendré.	137
Figure 4.6: Démarche d'analyse du service écosystémique de régulation des bioagresseurs au sein d'un verger de pommier (adapté de Haines-Young & Potschin, 2009). Chaque entité décrit le cas particulier du service de contrôle des bioagresseurs.	138
Figure 4.7 : Schéma de la démarche suivie pour la conception de l'arbre décisionnel décrivant les impacts des pratiques culturales et des conditions du milieu sur les dégâts de chaque bioagresseur sous IPSIM.	140
Figure 4.8: Sous-arbre de décision de la protection phytosanitaire contre le carpocapse.....	141
Figure 4.9: Sous-arbre de décision de la protection phytosanitaire contre le puceron cendré (A) et la tavelure (B).	142
Figure 4.10: Table d'agrégation des attributs ayant un impact sur la stratégie de protection en G2 du carpocapse. Chaque sous-attribut est décrit par ses échelles et par son poids. En rouge figurent les échelles d'attributs ayant un impact négatif sur le contrôle du carpocapse, en vert les échelles ayant un impact positif, en noir les échelles n'ayant pas d'impact. A droite, le résultat de la fonction d'agrégation pour l'attribut 'stratégie de protection en G2' est donné également sous forme qualitative. Les cas présentés sur la figure ne sont qu'un extrait du tableau d'agrégation, mais toutes les combinaisons possibles sont considérées dans le modèle IPSIM-Pommier.....	145
Figure 4.11: Filet Alt'Carpo monoparcélaire sur le site expérimental de La Pugère, système bas-intrants...	146
Figure 4.12: Facteurs climatiques favorisant le puceron cendré. Les sous-attributs sont encadrés et les échelles des attributs se trouvent en haut du schéma.....	147
Figure 4.13: Arbres de décision sous IPSIM-Pommier des facteurs influençant les dégâts des 3 bioagresseurs principaux du pommier. De gauche à droite, l'arbre de décision pour le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure. Chaque carré vert sur la gauche représente un nœud d'attributs, auquel correspond une table d'agrégation. Les triangles verts représentent les attributs de base, qui sont aussi les variables d'entrée du modèle.....	150
Figure 4.14: Comparaison entre les valeurs simulées par IPSIM-Pommier et les valeurs observées sur les différents systèmes présents dans les dispositifs de La Pugère et de Gotheron en 2014 et 2015 pour le carpocapse, la tavelure et le puceron cendré. Les valeurs sont données respectivement en % de fruits piqués à la récolte, % de fruit tavelés à la récolte et % de rameaux infestés à la mi-mai. « min » représente le minimum de la gamme de valeur simulée par IPSIM et « max » le maximum. « obs » représente la valeur observée sur les différents systèmes. RT signifie Résistant à la Tavelure.	154
Figure 5.1: Illustration of the general approach used for analyzing ecosystem services conflicts and synergies in apple orchards. Agricultural practices, ecosystem functions and ecosystem services are linked together through indicators, models and data analysis tools.....	165

Figure 5.2: Correlation plots of explanatory variables, i.e. agricultural practices (A), and of response variables, i.e. ecosystem functions (B) with respect to the first two PCAIV components (PC1 and PC2). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4.....	176
Figure 5.3: Boxplots of the effect of irrigation modalities on water comfort (A), N mineralized (B) and carbon sequestrated in tree's annual organs (C). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4	177
Figure 5.4: Boxplots of the effect of fertilizer type and quantity on nitrogen absorption (A), nitrogen nutrition index (B), nitrate leaching (C) and carbon sequestrated in tree's annual organs (D). The significance of the labels is given Tables 5.2 and 5.4.....	177
Figure 5.5: Boxplots of the impact of rosy apple aphid control on carbon sequestrated in tree's annual organs for all cropping systems (A) and for intensively fertilized (i.e. min140 and/or min70) and irrigated (i.e. com) cropping systems (B). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4	178
Figure 5.6: Correlation plots of explanatory variables, i.e. ecosystem functions (A), and of response variables, i.e. ecosystem services (B) with respect to the first two PCAIV components (PC1 and PC2). The significance of the labels is given in Tables 5.1 and 5.2.....	180
Figure 5.7: Correlation plots of explanatory variables, (i.e. ecosystem functions (A), and of response variables, (i.e. ecosystem services (B) with respect to the first and third PCAIV components (PC1 and PC3). The significance of the labels is given in Tables 5.1 and 5.2.....	181
Figure 5.8: Relationships between nitrogen absorption and yield, fruit mass and carbon sequestration. Lines represent linear regressions.....	182
Figure 5.9 : Four groups of apple orchard cropping systems projected on the two first components of the PCAIV (A) and their profiles of ecosystem services on radar plots (B). The significance of the labels is given in Table 5.1.	184
Figure 5.10: Trade-offs between marketed ecosystem services, i.e. yield and fruit mass, and non-marketed services, i.e. soil nitrogen availability, climate regulation, hydrological cycle maintenance and regulation and reduction of environmental nuisance due to pesticides. Each number represents a cropping system. The double-arrowed cropping systems represent the highest performances for marketed services and for non-marketed services, respectively. Red-circled cropping systems are those optimizing the trade-off between marketed and non-marketed services. Dotted lines are the distances from a theoretical ideal solution.....	186
Figure 6.1: Niveaux moyens d'émissions en France calculées pour le verger 'de référence' de pommiers non résistants à la tavelure (pomme non RT), de pommiers résistants à la tavelure (pomme RT) et d'un verger biologique (pomme bio) 'moyen' en France, pour les différents postes d'activité, exprimées en kg eCO ₂ /kg de pomme, sur l'ensemble du cycle du verger. Les émissions directes (vert clair) correspondent aux émissions de N ₂ O liées aux apports azotés (source : CTIFL).....	199
Figure 6.2: Relations entre dégâts et dommages de récolte avec l'exemple du carpocapse et du puceron cendré (Laget et al, 2015). Le seuil de dégâts dépassant un niveau acceptable est plus petit pour le	

carpocapse, étant donné que les dégâts impactent plus directement le nombre de fruit commercialisables.	203
Figure 6.3: Schéma conceptuel de la structuration des connaissances guidée par la modélisation, sous un angle très général.	207
Figure 6.4: Schéma de la méthode d'optimisation multi-critère couplant algorithme évolutif et modélisation (adapté de Grechi et al 2012) en vue d'une co-conception de systèmes de vergers de pommier. Les trois approches a priori, interactive et a posteriori permettant d'impliquer des parties prenantes dans la conception sont illustrées par des cases rouges.	210
Annexe 2.G: Données climatiques en 2014 et 2015 pour le site 'La Pugère' et en 2015 pour le site de Gotheron. Les données sont des moyennes mensuelles pour la température (°C) et l'évapotranspiration (mm) et une somme des valeurs mensuelles pour les précipitations (mm)	248
Appendix 3.B: Allometric relationship between fruit diameter and fruit dry mass on Golden cultivar in both Gotheron and Pugère sites in 2014 and 2015.	250
Appendix 3.E: Critical dilution curve for the studied conventional (CON) cropping systems in the case of Golden cultivar. Dots represent the nitrogen content of aboveground biomass (leaves plus fruit plus stems). The line represents the adjusted curve. As 2015 was an off-crop year in Pugère, biomass did not exceed 5 t/ha (red points). Gotheron's CON systems presented the highest nitrogen content for the highest biomass (green points).	262
Appendix 5.B: Ecosystem services profiles of the 5 identified non-dominant cropping systems on radar plots. CS stands for cropping system. CS1 and CS3 represent the same agricultural practices combination. They present the shortest distance to the ideal trade-off solution.	295

INTRODUCTION



“What now remains of the formerly rich land is like the skeleton of a sick man with all the fat and soft earth having wasted away and only the bare framework remaining. The plains that were full of rich soil are now marshes. Hills that were once covered with forests and produced abundant pasture now produce only food for bees. Once, the land was enriched by yearly rains, which were not lost, as they are now, by flowing from the bare land into the sea.”

- Plato (quoted in (Hillel 1992)), describing erosion in Attiki region, ancient Greece, 400 BC

1. La notion de « service écosystémique »

Les premières observations de l'impact négatif des activités humaines sur l'environnement remontent à la Grèce antique. Déjà, l'effet de la déforestation sur l'érosion du sol et l'assèchement des sources étaient déplorés par Platon en l'an 400 av. JC. Le terme service écosystémique a été utilisé dans les années 1960-70 par plusieurs auteurs qui posaient la question de la dépendance du bien-être humain à l'environnement, laquelle nécessite de préserver ce dernier (King 1966; Helliwell 1969). Par la suite, Ehrlich a fait explicitement référence aux services écosystémiques comme légitimation de la conservation de la biodiversité (Ehrlich and Wilson 1991). La recherche scientifique sur les services écosystémiques s'est développée de manière exponentielle durant la dernière décennie. D'après Tancoigne et al., (2014) ce concept est particulièrement mobilisé par l'écologie et la biologie de la conservation, d'où il tire son origine (Costanza et al. 1997; Daily 1997; Hooper et al. 2005). Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), grande étude internationale sur l'état des écosystèmes commanditée par l'Onu et menée pendant 5 ans par plus de 1300 scientifiques provenant d'une cinquantaine de pays, a formalisé le concept de « service écosystémique » en utilisant la définition proposée par Daily (1997): *les services écosystémiques sont les bénéfices*¹ tirés des écosystèmes par les humains*. Quatre types de services sont alors distingués : des services de support comme les cycles des nutriments, des services de régulation comme celui du climat, des services d'approvisionnement comme la production de fruits, et des services culturels comme les sources d'inspiration pour l'art ou la qualité esthétique.

Cependant, plusieurs auteurs ont remis en question la pertinence de ce type de classification (Wallace 2007; Haines-Young and Potschin 2013), en notant que certains services, en particulier les services de support, sont des moyens utilisés, et pas des services en soi. Des alternatives à la classification du MEA ont été proposées. C'est notamment le cas du Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) (Haines-Young and Potschin 2013). Celui-ci classifie les services selon une nomenclature hiérarchique particulière en trois grands groupes : (i) les services d'approvisionnement, (ii) les services de régulation et de maintenance, et (iii) les services culturels.

Dans les deux études qui ont initié le courant de recherche actuel sur les services écosystémiques (Costanza et al. 1997; Daily 1997), les services écosystémiques étaient définis comme une gamme de conditions et processus au travers desquels les écosystèmes et leur biodiversité accordent des bénéfices aux hommes. Autrement dit, lorsqu'on s'interroge sur la manière dont un écosystème peut fournir des services, il faut revenir aux processus écologiques, qui dépendent en partie d'éléments abiotiques comme les éléments minéraux ou la structure du sol pour les cycles de l'azote, de l'eau ou

¹ Tous les mots suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire

du carbone, et d'éléments biotiques comme les microorganismes du sol impliqués dans ces cycles. C'est plus précisément le modèle en cascade de Haines-Young and Potschin (2009) que nous utilisons dans ce travail de thèse (Fig. i.1). Ce modèle place les services au sein d'une chaîne de production qui lie les structures ou processus biophysiques au sein de l'écosystème, les fonctions écosystémiques*, les services écosystémiques et les bénéfices* tirés par les humains, qui peuvent faire l'objet d'évaluations. Dans le cas des agroécosystèmes, les pratiques agricoles impactent aussi bien des composantes abiotiques que biotiques, et, par conséquent, des fonctions écosystémiques.

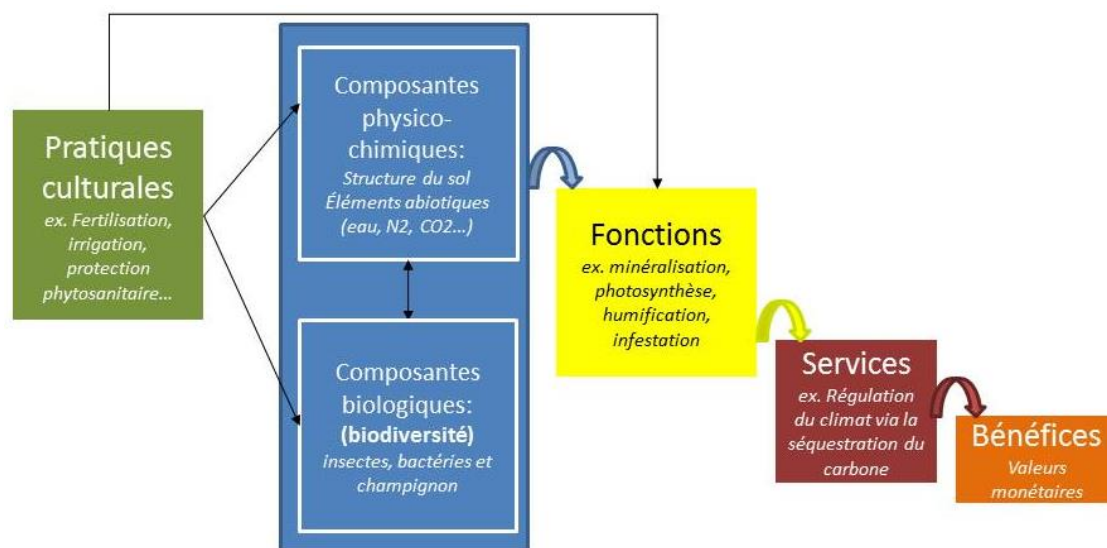


Figure i-1: Modèle en cascade liant les pratiques agricoles, les composantes physiques, chimiques et biologiques de l'agroécosystème, les fonctions écosystémiques, les services écosystémiques et les bénéfices tirés de ces services (adapté de Haines-Young & Potschin, 2009).

2. Les services écosystémiques dans le cadre de l'agriculture et de la pomiculture

2.1. La notion d'agroécosystème

L'agroécosystème est un écosystème modifié et en partie contrôlé par l'homme en vue de dégager une production - un service en général marchand. Il peut cependant également fournir d'autres services écosystémiques, des services non marchands, comme la régulation du climat, la disponibilité de certains minéraux dans le sol, ou la régulation des bioagresseurs. Quantifier les services écosystémiques non marchands des agroécosystèmes de la même façon que des services marchands est aujourd'hui un réel défi pour la mise en place de réglementations et de modes de gestion agricoles : cela permettrait de créer des instruments de dialogue avec les porteurs d'enjeux, qui ne sont pas que des agriculteurs, et un espace de co-construction de projets et plus particulièrement de systèmes de culture* innovants et économes en intrants. Dans le cas de filières de production

fruitière comme celle de la pomme, qui englobent de nombreux enjeux parfois contradictoires selon les intérêts des différentes parties prenantes, l'analyse des services écosystémiques au sein des vergers peut constituer une base de discussion utile pour la recherche de compromis.

Pour ce qui concerne les services écosystémiques, les agroécosystèmes présentent deux particularités majeures par rapport à d'autres types d'écosystème. La première est que les services écosystémiques sont impactés plus ou moins directement (via les fonctions écosystémiques) par des pratiques agricoles. Ces pratiques agricoles peuvent avoir un impact positif : il y a dans ce cas création d'un bénéfice pour le bien-être humain. Dans le cas contraire, les pratiques peuvent causer des dommages ou des pertes, appelées « dysservices » par certains auteurs (Zhang et al. 2007) ou plus simplement nuisances. La deuxième particularité est liée à la multifonctionnalité d'un agroécosystème. Il s'agit d'atteindre un niveau d'équilibre entre la production de denrées alimentaires et les services de régulation et de maintenance. Pour cela, un travail d'analyse des relations entre services écosystémiques est nécessaire. Ces relations, couramment dénommées synergies (relations positives) et conflits (relations négatives), sont régies par l'inter-connectivité des fonctions écosystémiques sous-jacentes et pilotées par les facteurs qui jouent sur ces fonctions, notamment les pratiques agricoles comme indiqué plus haut (Bennett et al. 2009).

2.2. Les particularités du verger de pommiers

La France fait partie des plus gros pays producteurs et exportateurs de pommes dans le monde, avec plus de 650 000 tonnes exportées chaque année pour une production annuelle nationale de 1,8 millions de tonnes (Serrurier 2013a). L'intérêt économique du marché de la pomme est donc majeur pour la filière 'Fruit' française. Le marché de la pomme est cependant confronté à des enjeux aussi bien économiques, qu'environnementaux et sanitaires. La question la plus médiatisée est celle de l'utilisation de produits phytosanitaires : d'une part ces produits affectent négativement la biodiversité du verger, notamment fonctionnelle, et de nombreux compartiments de l'environnement, ainsi que les producteurs et salariés des exploitations ; d'autre part, les exigences gustatives, visuelles et sanitaires du mode de consommation actuel réduisent les marges de manœuvre pour la diminution des traitements phytosanitaires. Ce qui est beaucoup moins médiatisé et étudié est la contribution possible des vergers à la régulation du climat, eu égard au statut pérenne des arbres fruitiers. De même, le fonctionnement du sol en interaction avec l'arbre sont peu étudiés en verger de pommiers dans le cadre des cycles biogéochimiques, malgré l'intérêt de l'enherbement entre les rangs et du caractère pérenne des arbres pour ces cycles.

Le Ctifl (Centre Technique Interprofessionnel des fruits et légumes) – dont une partie de l'activité vise à favoriser l'innovation technique dans les entreprises de production des filières de fruits et légumes – et l'unité PSH (Plantes et Systèmes de cultures Horticoles) de l'INRA d'Avignon se sont associés autour de cette thèse pour développer des recherches visant à analyser la durabilité des vergers de pommiers sous un angle nouveau: celui des services écosystémiques. Le cadre d'étude de la thèse est limité à la dimension strictement biotechnique du verger de pommiers. Dans ce cadre, nous accordons une importance particulière à l'effet sur les « bouquets » de services écosystémiques de pratiques agricoles comme l'irrigation, la fertilisation ou la protection phytosanitaire en interaction avec les composantes physico-chimiques et biologiques du milieu. Au-delà des pratiques individuelles, nous considérons leur combinaison dans des systèmes de culture.

3. Objectifs de la thèse et démarche globale

L'objectif de cette thèse est d'analyser les synergies et conflits entre services écosystémiques en étudiant d'une part les liens entre services écosystémiques et fonctions sous-jacentes, et d'autre part, les impacts des pratiques agricoles et conditions climatiques sur ces fonctions écosystémiques selon la chaîne en cascade de Haines-Young and Potschin (2009).

La démarche méthodologique générale est décrite sous forme de schéma explicatif (Fig. i.2). Elle comprend trois étapes majeures décrites dans les lignes suivantes.

Lors de l'étape 1, nous avons identifié et décrit, via des indicateurs, les fonctions et services écosystémiques au sein d'un verger de pommiers. Pour cela, nous avons d'abord dressé un état des connaissances du fonctionnement agroécologique des vergers, en mettant en exergue les processus écologiques sous-tendant la fourniture de services et leur modulation par des pratiques agricoles, un type de sol ou un climat donné. En termes de services, nous avons utilisé la classification du CICES (voir Section 1) et retenu la production de fruits en quantité et qualité, la régulation du climat par l'atténuation de l'émission des gaz à effet de serre, la disponibilité en azote dans le sol, la régulation du cycle de l'eau, le contrôle des bioagresseurs et la pollinisation. Nous avons également considéré les nuisances des pratiques agricoles. A l'issue de ce bilan et pour la suite de l'étude, nous avons choisi plusieurs indicateurs pour décrire ces services et ces fonctions écosystémiques en fonction de : i) leur capacité à caractériser les services ou fonctions de la manière la plus directe possible, ii) leur lien avec des pratiques agricoles ou des conditions pédoclimatiques, iii) la facilité à les quantifier. A ce stade, pour des raisons de faisabilité, nous avons écarté certains services identifiés lors du bilan des connaissances ou restreint leur gamme. Ainsi, nous avons exclu de notre étude le service de pollinisation et réduit au strict nécessaire la description du service de production des fruits – rendement et masse du fruit –, excluant donc de nombreux critères de qualité.

Pour analyser ces indicateurs, nous aurions pu nous limiter à une approche par bilans en ce qui concerne l'azote, le carbone et l'eau. Cependant la plupart des fonctions reposent sur des processus dynamiques (flux d'eau et d'azote, photosynthèse, transformation et allocation du carbone, etc...) fortement interdépendants. La modélisation nous est apparue d'un intérêt majeur pour simuler ces interactions en intégrant les conditions du milieu et les effets de certaines pratiques culturales.

A l'étape 2, nous avons utilisé des modèles pour quantifier les indicateurs et comparer l'impact de systèmes de culture sur les fonctions écosystémiques. Un premier modèle utilisé a été STICS, un modèle de simulation journalière des interactions sol - plante - atmosphère (Brisson et al. 2009). STICS est générique, c'est-à-dire qu'il est capable de simuler le développement et la croissance de différentes cultures (Launay et al. 2005). En culture pérenne, il a été adapté à différents cépages de la vigne (Garcia de Cortazar Atauri 2006) et est en cours d'adaptation sur *Miscanthus Giganteus* (Strullu et al. 2014). Une partie du travail de thèse a consisté à adapter STICS au pommier grâce à des données expérimentales recueillies dans le sud-est de la France. STICS ne tient pas compte des attaques de bioagresseurs. Aussi, pour qualifier la sévérité des dégâts causés par les trois bioagresseurs principaux du pommier en région sud-est (le puceron, le carpocapse et la tavelure), nous avons utilisé le cadre de modélisation IPSIM (Aubertot and Robin 2013) que nous avons paramétré pour des vergers de pommiers du sud-est de la France.

La troisième et dernière étape de la démarche a consisté à lier, à partir de simulations des modèles, pratiques agricoles, conditions pédoclimatiques, fonctions écosystémiques et services écosystémiques dans des gammes de situations différentes, réelles ou fictives (voir Section 4), dans le but de formaliser et d'analyser les synergies et conflits entre services écosystémiques.

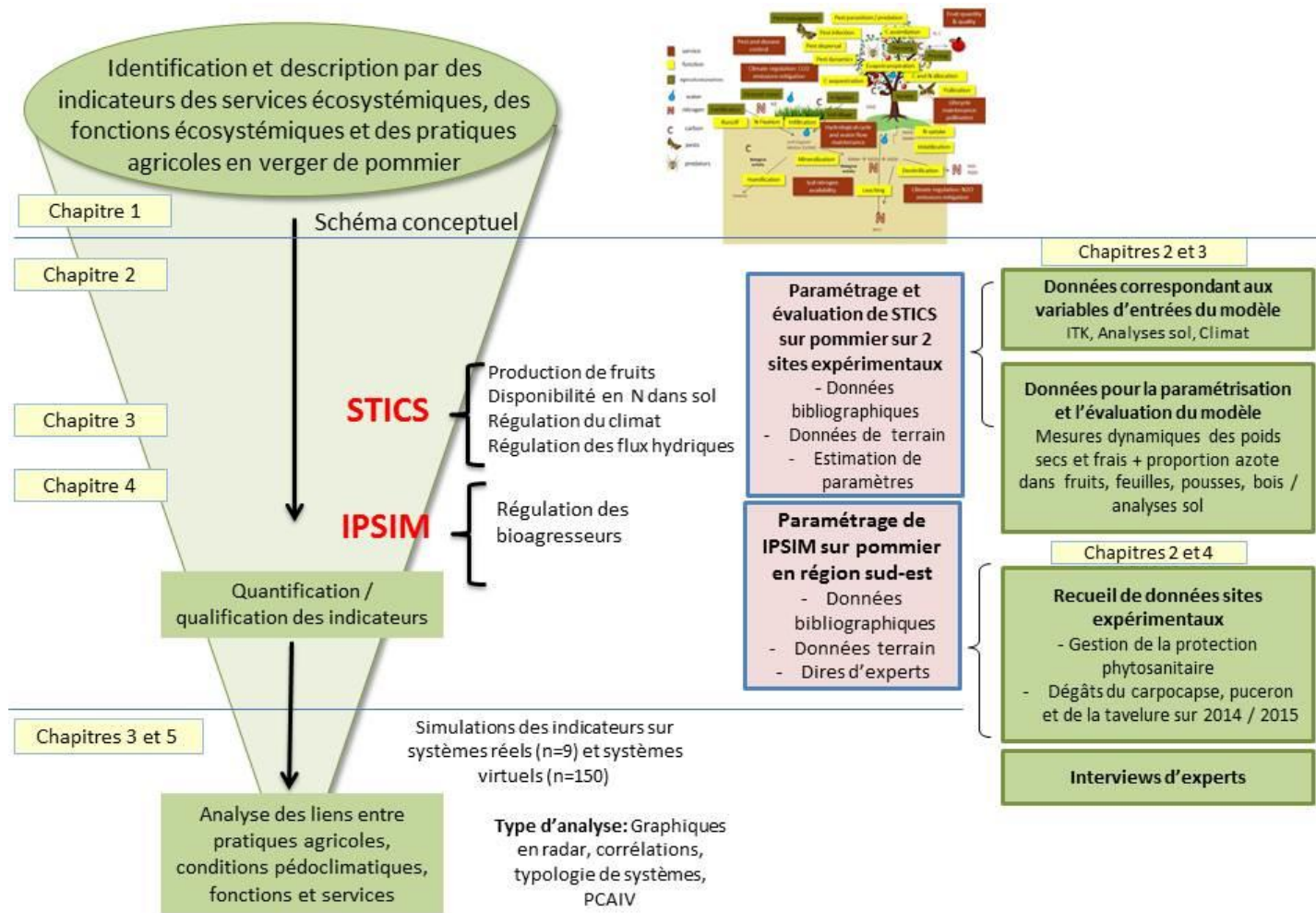


Figure i.2 : Démarche globale pour analyser les liens entre services écosystémiques multiples en verger de pommiers. A gauche sont figurées les trois étapes et leurs termes de passage, au milieu est donnée une brève description du travail de modélisation avec les modèles STICS et IPSIM et à droite une description du travail de terrain. Chaque case en jaune fait référence à un chapitre de la thèse.

4. Architecture du mémoire de thèse

Cette thèse est organisée en 6 chapitres. Les chapitres 1, 3 et 5 font l'objet d'articles soumis ou à soumettre (voir Section 5).

Le **chapitre 1** est une synthèse bibliographique des services écosystémiques en vergers, sans restriction au pommier. Nous nous sommes placés à l'échelle du verger et avons pris en compte une gamme large quoique non exhaustive de services (voir Section 3), liant les compartiments sol – arbre – atmosphère dans leurs dimensions abiotiques et biotiques. L'objectif de cette synthèse était d'identifier les interactions entre fonctions écosystémiques sous-jacentes à ces services ainsi que les impacts des pratiques agricoles et des conditions pédoclimatiques sur ces fonctions et services. Les conclusions de cette synthèse ont été mobilisées pour la suite du travail.

Le **chapitre 2** présente une description brève des méthodes, outils et mesures utilisés dans ce travail de thèse. Un ensemble de mesures a été réalisé sur deux dispositifs expérimentaux dans le sud-est de la France durant une (pour l'un des sites) ou deux années (pour l'autre site); dans chacun d'entre eux, trois types de systèmes de culture étaient étudiés. Comme spécifié précédemment, des indicateurs, décrivant les fonctions et services à analyser, ont été quantifiés par deux modèles - STICS et IPSIM - dans deux gammes de situations : une gamme restreinte en termes de systèmes de culture combinés à un pédoclimat (issue des dispositifs expérimentaux étudiés), et une large gamme de systèmes de culture virtuels avec des conditions pédoclimatiques fixées. Les mesures et observations réalisées pour paramétrer les deux modèles sont décrites dans ce chapitre.

Pour la première gamme de situations réelles (9 au total), le **chapitre 3** décrit à la fois le paramétrage du modèle STICS sur les vergers de pommiers étudiés, la simulation d'indicateurs de fonctions et services écosystémiques via ce modèle et l'analyse des impacts des pratiques agricoles sur les fonctions et services en question. Les services concernés sont la production de fruits en quantité et qualité, la régulation du climat par l'atténuation de l'émission des gaz à effet de serre, la disponibilité en azote dans le sol, et la régulation du cycle de l'eau. Ce chapitre est une première utilisation de cette approche d'analyse de services. Un profil de services a été formalisé pour chaque situation - système de culture combiné avec un pédoclimat- et l'analyse a permis de mettre en avant les leviers pilotant la distribution de services écosystémiques multiples.

Le **chapitre 4** décrit le paramétrage du cadre de modélisation IPSIM permettant de qualifier le niveau de dégâts causés par trois bioagresseurs majeurs du pommier, le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure, en fonction des pratiques de protection et des conditions du milieu. Ce modèle a été basé

sur un travail bibliographique, des dires d'experts et des données existantes de comptage de bioagresseurs dans les deux dispositifs expérimentaux pré-cités.

Le **chapitre 5** reprend la même démarche que dans le chapitre 3, mais en ajoutant aux 4 services étudiés dans le chapitre 3 le contrôle des bioagresseurs, grâce aux acquis du chapitre 4. Ici le pédoclimat était fixé mais nous avons considéré 150 systèmes de cultures fictifs pour une analyse plus large de l'impact des pratiques agricoles sur les fonctions et les services. La recherche de compromis entre services marchands et non-marchands au sein du bouquet de services étudiés est présentée et discutée dans ce chapitre.

Le mémoire de thèse se termine par une discussion générale et des propositions de perspectives à ce travail de thèse (**chapitre 6**).

5. Publications et communications scientifiques

Publications soumises ou à soumettre dans des revues scientifiques à comité de lecture

Demestihis C, Plénet D, Génard M., Raynal C, Lescourret F. **'Ecosystem services in orchards : a review'** accepté avec révisions majeures dans *Agronomy for Sustainable Development* (ASD).

Demestihis C, Plénet D, Génard M, Garcia de Cortazar-Atauri I, Launay M, Ripoche D, Beaudoin N, Simon S, Charreyron M, Raynal C, Lescourret F. **'Analyzing ecosystem services in apple orchards using the STICS model'**, à soumettre à la revue *European Journal of Agronomy* (EJA).

Demestihis C, Plénet D, Génard M, Raynal C, Lescourret F. **'A simulation study of synergies and conflicts between multiple ecosystem services in apple orchards'**, à soumettre à la revue *Agriculture, Ecosystems and Environment* (AEE).

Communications orales et posters

Demestihis, C., Plénet, D., Génard, M., Grasselly, D., Ricard, J., Simon, S., Charreyron, M., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Launay, M., Beaudoin, N., Robin, M., Lescourret, F., 2015. Multiple ecosystem services analysis in apple orchard, Poster in: International Symposium on Innovation in Integrated and Organic Horticulture – INNOHORT, 8-12 juin 2015, Avignon, France.

Demestihis, C., Plénet, D., Génard, M., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Launay, M., Ripoche, D., Beaudoin, N., Lescourret, F., 2015. Utilisation de STICS pour l'analyse des services écosystémiques multiples en verger de pommiers, in: Xe Séminaire Des Utilisateurs et Concepteurs Du Modèle STICS, 24 -26 mars 2015, Rennes, pp. 96 – 97.

Demestihás, C., Plénet, D., Génard, M., Grasselly, D., Ricard, J., Simon, S., Charreyron, M., García de Cortazar-Atauri, I., Launay, M., Beaudoin, N., Robin, M., Lescourret, F., 2015. A procedure to analyze multiple Ecosystem Services in apple orchards, in: Proceedings of the 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 septembre 2015, Montpellier, France, pp. 399 – 400.

Demestihás, C., Plénet, D., Génard, M., Grasselly, D., García de Cortazar-Atauri, I., Launay, M., Ripoché, D., Lescourret, F., 2016. A crop simulation model supporting multiple ecosystem services analysis in apple orchards, in: ISHS International Symposium Hortimodel - Models for Plant Growth, Environment Control and Farming Management in Protected Cultivation, 19-22 septembre 2016, Avignon, France.

Demestihás, C., Charreyron, M., Bouvery, F., Grasselly, D., Plénet, D., 2015. Dynamique d'accumulation de matière sèche et d'azote par le pommier dans des systèmes de culture à faible niveau d'intrants, in: 12èmes Rencontres de La Fertilisation Raisonnée et de L'analyse (Poster), 18 – 19 novembre 2015, Lyon, France.

Plénet, D., Demestihás, C., 2016. Dynamique d'accumulation de matière sèche et d'azote dans les vergers de pommiers, in : N-pérennes, un outil de raisonnement de la fertilisation azotée en cultures pérennes : application à la vigne et à certains arbres fruitiers . Casdar N pérennes et RMT fertilisation. Colloque 18 octobre 2016, Paris.

CHAPITRE 1: QUE SAIT-ON SUR LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES EN VERGERS ?



ECOSYSTEM SERVICES IN ORCHARDS: A REVIEW²

Abstract

Arboriculture must maintain acceptable fruit production levels while preserving natural resources. This duality can be analyzed with the concept of ecosystem service. We reviewed the literature on orchards to explain how ecological functions modified by agricultural practices provide six ecosystem services - fruit production, climate regulation, soil nitrogen availability, water regulation, pest and disease control, and pollination - and which indicators could describe them. The major points are, first, that orchards have a high potential of multiple services. They can sequester from 2.8 to 5 t C/ha/year. Their perennial character and multi-strata habitat, as well as the opportunity of creating diversified hedgerows and cover crops in alleys, may contribute to a high level of biodiversity and related services. Second, every service depends on many functions. Fruit yield, which could reach up to 140 t/ha in apple orchards, is increased by light interception, carbon allocation, and nitrogen and water uptake. Third, a single function impacts many services. Nitrogen leaching, enhanced by heavy rains and overfertilization, reduces soil nitrogen availability for the plant and deteriorates the quality of drained water. Fourth, several agricultural practices can affect a single function. Fertilization, cultivar/rootstock choice, and groundcover management influence nitrogen uptake by trees. Fifth, a single practice can affect several functions, and hence several services. Groundcover increases humification and reduces denitrification and runoff, thus enhancing soil nitrogen availability and water regulation. It also enhances biotic interactions responsible for pest control and pollination. To study multiple ecosystem services in orchards, we suggest using models capable of simulating service profiles and their variation according to management scenarios. We then refer to the available literature to show that conflicts between provisioning and regulating services can be mitigated by agricultural practices. Improved knowledge of soil processes and carbon balance, as well as new models that address multiple services are necessary to foster research on ecosystem service relationships in orchards.

Keywords: agricultural management, fruit production, climate regulation, soil nitrogen availability, water regulation, pest and disease control, pollination, indicator

² Ce chapitre a été soumis au journal 'Agronomy for Sustainable Development'

1. Introduction

Arboriculture today is beset by contradictory demands. On the one hand, there is a pressing demand regarding the quality of products. The quality standards of fruits, most of which are sold to the fresh market, are very high (Codron et al. 2005). At the same time, on a global scale, the fruit sector is very competitive and yield is a great concern for fruit growers. This has led to the intensification of production techniques, especially of pesticide use in orchards worldwide. For example, in 2012, French apple orchards (Fig. 1.1) received an average of 35 pesticide treatments (MAAF 2014). On the other hand, society has expressed concern about this over-use of agricultural inputs because of their dramatic impact on natural resources and ecosystem functioning, including the pollution of groundwater, subsoil and the atmosphere, as well as the decrease in biodiversity (Geiger et al. 2011; Mottes et al. 2014).



Figure 1.1 Apple orchard with anti-hail nets on *the Golden Delicious cultivar*, in *southeastern France* (photo credits: C. Demestihias)

Ecological intensification is aimed at reconciling high yield goals with minimal negative impacts on the environment. This can be done by integrating the management of ecosystem services into crop production systems (Bommarco et al. 2013). During the 1970s, the term “Ecosystem Service” began to appear in the scientific literature, but two important publications in the 1990s, those of Costanza et al. (1997) and of Daily (1997), were actually responsible for initiating ecosystem service research. In these publications, ecosystem services were defined as the wide array of conditions and processes

through which ecosystems and their biodiversity confer benefits to humanity. More precisely, the cascade model (Fig. 1.2) of Haines-Young and Potschin (2009) places ecosystem services in the middle of a ‘production chain’, which links the entities that define services upstream: biophysical structures and functions and, downstream, the benefits reaped from the services, which are their real value.

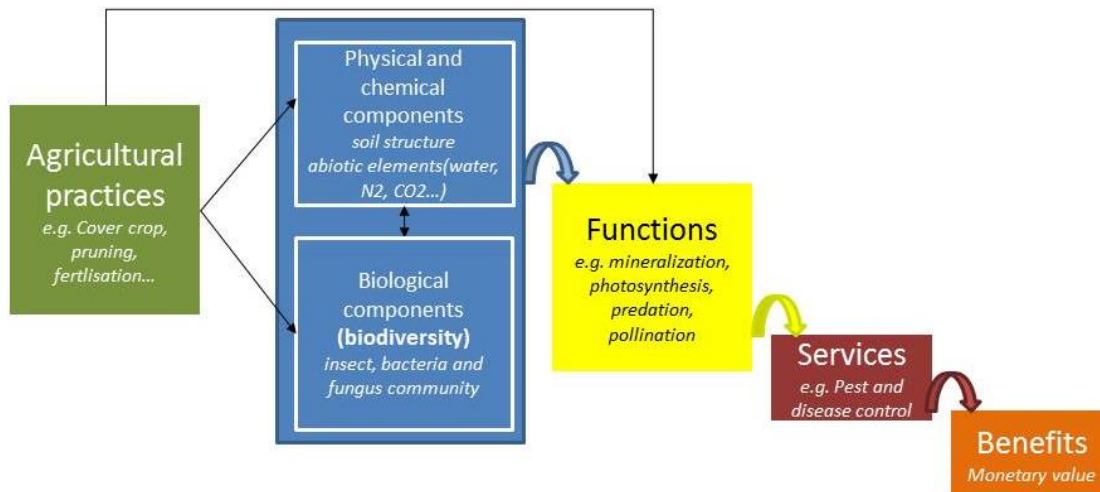


Figure 1.2: Relationship between agricultural practices, physical and biological structures, functions, services and benefits according to the “cascade model” of Haines-Young and Potschin (2009) in an agroecosystem.

The Millennium Ecosystem Assessment (Reid et al. 2005) classified ecosystem services into four categories: regulating, supporting, provisioning and cultural services. However, supporting services are means to human ends, and not ends themselves (Wallace 2007). Based on these considerations, alternative ecosystem service classifications have been proposed. Most recently, the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) was confined to the ecosystem outputs directly consumed or used by a beneficiary, i.e., ‘final’ services, and thus excluded the supporting services linked to ecosystem functions that underpin these final services (Haines-Young and Potschin 2013).

In sharp contrast to the case of forest ecosystems, which are known for their ability to sequester carbon or regulate the water cycle (Krieger 2001; García-Nieto et al. 2013), the concept of ecosystem service has not yet been widely used in fruit orchard research. A major difference between orchard and forest ecosystems is that in orchards, the focus is on the production of consumable and high quality food, whereas the multi-functionality of wood-producing forests, which is close to the ecosystem service concept, has long been recognized. However, orchards present particular features

that could make them interesting for ecosystem service studies. For example, the perennial character of trees, the multi-strata habitat and the plant diversity within the boundaries of orchards (Fig. 1.3) may contribute to a high level of biodiversity (Simon et al. 2010). The potential of carbon sequestration by orchard soils could be valorized and increased to contribute to greenhouse gas mitigation (Rodríguez-Entrena et al. 2012).



Figure 1.3: Opilion spider (*Hadrobunus grandis*) on Crimson Crisp® cultivar apple (photo credits: C. Demesthas)

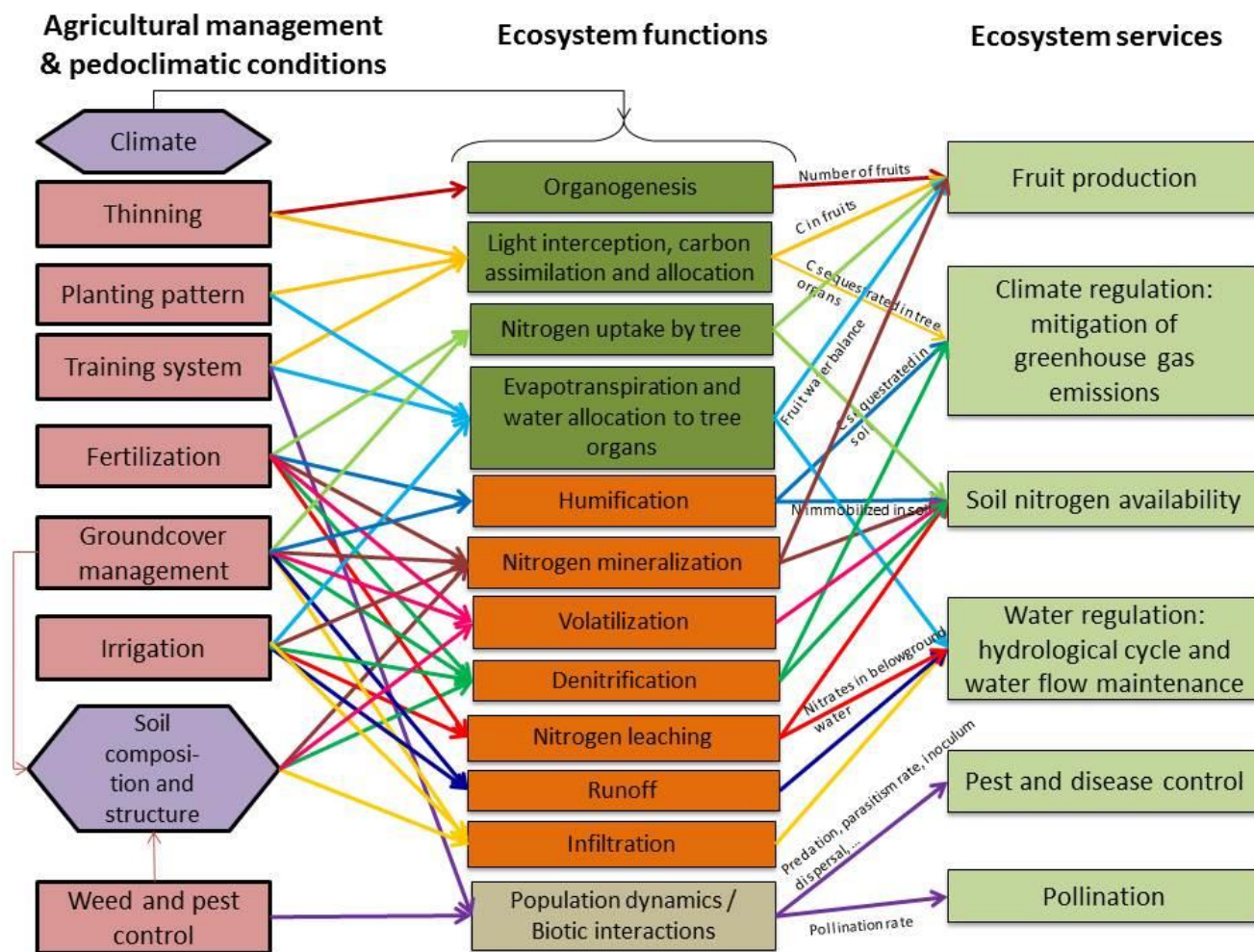
Managing multiple ecosystem services appears to be a great challenge for agroecosystems (Zhang et al. 2007). In orchards as in other agroecosystems, this requires broadknowledge about the underlying ecological functions and of the effect, in turn, of agricultural management on these functions. It should be noted that agricultural practices may impact ecosystem services positively, but they might also impact them negatively. This negative impact is called a disservice by some authors (Power 2010, Zhang et al 2007). Typically, in an orchard, pesticide use has negative consequences on the quality of water (Loewy et al. 2003) or on biodiversity (Floch et al. 2009). Pesticides may disturb food webs since they are not only lethal to crop pests but also to beneficiary insects as well as pollinators (Biddinger et al. 2013; Geiger et al. 2011; Thompson 2003). Herbicides may also disturb natural nutrient decomposition by killing beneficiary earthworms, fungus and bacteria in soil (Oliveira and Merwin 2001; Andersen et al. 2013).

The objective of this review is to describe ecosystem services and their management in orchards, based on an analysis of agroecosystem functioning. This review is based on the CICES classification. The scale of the study is the plot, which is composed of trees, alleys, soil, hedges and various biotic and abiotic elements such as pests, natural enemies, gas, mineral elements and water. In the following section, we review the literature on orchards to explain how ecological functions modified by agricultural practices provide ecosystem services, and we discuss which indicators could best describe ecosystem services. We also consider the negative environmental impacts of agricultural practices. The ecosystem services analyzed include fruit production, climate regulation by mitigation of greenhouse gas emissions, soil nitrogen availability, water regulation in terms of hydrological cycle and water flow maintenance, pest and disease control, and life cycle maintenance through pollination. Lastly, we present a general procedure to analyze multiple ecosystem services and their relationships in orchards, using examples from other crops.

2. Ecosystem services in commercial orchards

The scheme in Figure 1.4 serves as a guide for the following description. In this description we focus, for each of the six selected services and according to the cascade model of Figure 1.2, on the underlying ecosystem functions, the way agricultural management influences them and which service indicators could be used. The choice of ecosystem service indicators is a sensitive issue. Authors agree that they should adequately characterize the complexity of the ecosystem but be simple enough to be efficiently monitored and modeled, while staying closely linked to ecosystem services and being predictive of changes within ecosystem service relationships (Dale and Polasky 2007; de Groot et al. 2010; van Oudenhoven et al. 2012).

In Figure 1.4, many ecosystem functions, which are impacted by climate and soil composition and structure, transform abiotic elements such as nitrogen, carbon or water and/or enable them to flow through the whole orchard system through other compartments such as the atmosphere and the groundwater table and, more globally, towards other surrounding ecosystems. Several connected functions may contribute to one service – evapotranspiration, carbon assimilation and nitrogen uptake are all functions that contribute to fruit production. However, one function may also have an impact on many services. Thus, nitrogen leaching, enhanced by heavy rains and over-fertilization, reduces soil nitrogen availability for the plant and deteriorates the quality of drained water.



1

2 Figure 1.4: Linking agricultural management (pink boxes), ecosystem functions (dark green boxes for plant- related functions, orange boxes for soil related functions and gray box for pest-
3 related functions) and ecosystem services (light green boxes) in the orchard agroecosystem. The pink box, 'Groundcover management', concerns a wide range of options including legumes,
4 cover crops, grasses, pruning wood and senescent leaves left on the ground, etc. Agricultural management, ecosystem functions and ecosystem services are linked by lines and each color is
5 associated with a function. Soil composition and structure as well as climate (violet boxes) are considered separately from agricultural practices. Soil is impacted by groundcover management
6 as well as weed and pest control. Climate is considered to impact all functions.

In Figure 1.4, only the major levers of agricultural management that act upon ecosystem functions are presented. On the one hand, a single function can be affected by several agricultural practices. Thus, nitrogen uptake by trees is influenced by fertilization, cultivar/rootstock choice and groundcover management. On the other hand, a single agricultural practice can affect one or more ecosystem functions, thus modifying several ecosystem services at the same time. Irrigation affects functions that contribute to nitrogen availability, water regulation and fruit production. An agricultural practice can also affect a given function in various ways. Fertilization has contrasted effects on nitrogen leaching and uptake by trees depending on whether it is mineral or organic. In addition, as mentioned above, we consider disturbances to the ecosystem caused by agricultural practices as a result of pollution.

2.1 Provisioning service: fruit production in terms of quantity and quality

Fruit yield is the result of the number of fruits and fruit mass at harvest. Fruit mass and fruit quality result from the fruit growing process, which is mainly driven by carbon. We therefore analyze the fruit production service in terms of organogenesis of fruits and leaves, light interception, carbon assimilation and allocation (Fig. 1.4). We also consider water and nitrogen effects, since nitrogen and water stress may impact fruit yield and quality. Temperature determines the phenology of fruit trees and also impacts crop load and fruit color (Saure 1990), but its effects will not be discussed in detail in this review.

2.1.1 Organogenesis

Fruit initiation is a complex process. Under temperate climates, the flower development cycle in fruit trees often lasts from 9 to 10 months, putting flower buds into dormancy between two major activity periods: the appearance of floral primordia in summer and the final flower formation during the following spring. Several factors impact this initiation: endogenous or exogenous hormones and, more specifically, gibberellins, which tend to decrease flower bud formation in alternately bearing apple cultivars, or ecological conditions such as temperature (Koutinas et al. 2010). It is hypothesized that under low light, a reduced number of flower buds are differentiated (Grappadelli 2003). In order to set fruits, compatible pollen grains must be deposited on the stigma. In the case of self-incompatible or dioecious species, pollinizers must be compatible with the cultivar being pollinated and blooming at the same time (Dennis 2003). In this case, the pollination service (Section 2.2.5.) is crucial, since pollen is primarily transferred by insects such as honey or bumble bees (Dennis 2003). Agricultural practices such as floral thinning, which may be of interest to reach an optimal number of

fruits for yield objectives, may use drying agents that disturb the pollination or fertilization process (Mathieu et al. 2011).

2.1.2 Light interception, carbon assimilation and allocation

Light has an immediate effect on the photosynthetic activity of fruit trees, since the net total dry matter productivity of apple orchard systems depends on intercepted photosynthetic photon fluxes ranging from 400 to 700 nm (Wünsche et al. 1996). The most light-efficient apple orchard configurations have been reported as being capable of intercepting 60-70% of available radiation, which may translate into high yields (Grappadelli 2003) that can reach up to 120 to 140 t/ha (Lakso et al. 1999) as a theoretical potential. In apple crops, the mean conversion efficiency of light intercepted to grams of fruit ranges from 4 to 6.1 g / MJ according to the cultivar, the rootstock as well as the tree training system (Robinson et al 1993), but values as low as 2 g/MJ have been assessed (Robinson et al. 1991b).

Planting patterns and training systems are ways of increasing light interception. At the orchard level, a fraction of light does not reach the tree canopy due to the alleyways maintained between rows that make up a large proportion of orchard area uncovered by trees (Jackson and Palmer 1980). Increasing the height of the trees in proportion to the clear alley width helps alleviate this problem since it results in increasing light interception (Grappadelli 2003). More direct means consist in decreasing tree spacing through planting density and changing arrangements since, for example, there is higher light interception with square tree spacing than with rectangular tree spacing (Palmer et al. 1992). Natural training systems used in apple orchards, including centrifugal training (Lauri 2002), may allow good light penetration but require highly developed horticultural skills.

Carbon assimilation and allocation depend on complex source-sink relationships within the tree. Fruits are sinks and the fruit load is important in this respect. A heavy sink load promotes the synthesis of soluble sugars that are readily loaded into the phloem and transported to sink organs (Klages et al. 2001). On the contrary, a low demand for carbon enhances the accumulation of starch, first in leaves and then in roots and other woody tissues (Naschitz et al. 2010), inhibiting photosynthesis. When fruit demand is higher than the potential carbon supply, the competition between fruits is intensified and results in fruit abscission (Zibordi et al. 2009), whereas in the reverse situation, fruit set and growth are favored. However self-regulatory mechanisms such as natural fruit abscission are usually not sufficient to meet market requirements for fruit size. In many apple-producing areas, early removal of flowers and newly-grown fruits are currently used to reduce competition for photosynthates (Racskó 2006). The severity and timing of thinning are major factors that impact crop load, return bloom and, consequently, fruit size and yield.

The carbon source-sink balance may also impact other fruit quality characteristics. It has been shown that a lower crop load in 'Jonagold' apple cultivar results in a higher content of polyphenols, redder fruit blush, a higher percentage of soluble solids in fruit flesh and better flesh firmness in comparison to fruits from high-cropping trees (Stopar et al. 2002). The crop load strongly impacts carbon allocation between different biochemical compounds and, as a result, the profile of fruit in terms of soluble sugars and acids as shown for peach fruit (Souty et al. 1999; Génard et al. 2008).

2.1.3 Water and nitrogen effects

Water stress (deficit of water allocation to tree organs; Fig. 1.4) can have serious impacts on carbon assimilation since shoot expansion is almost linearly reduced by declining midday stem water potentials (Lakso 2003). Furthermore, the coupled translocation of water and sugars within the tree undeniably links water stress to carbon allocation in fruits (Daudet et al. 2002). A high level of water stress may reduce fruit size and increase the proportion of dry matter in the flesh and, consequently, soluble solids in the fruit. Water stress also tends to increase titrable acidity in ripe fruits probably through dilution/dehydration effects and osmotic adjustment (Etienne et al. 2013). The timing of water stress is important. Late spring and early summer water stress can have dramatic effects on fruit set and growth (Lakso 2003). Kilili et al. (1996) have shown that withholding irrigation late in the season (104 days after full bloom) improved the quality of 'Braeburn' apple cultivar in terms of increased total soluble solids, firmness, soluble sugars and intensified red skin color without adverse effects on fruit size and yield. These results were confirmed by Mpelasoka et al. (2001).

Irrigation classically seeks to compensate for water stress. The irrigation system is of utmost importance. The root system distribution depends on the spatial distribution of water status in the soil (Sokalska et al. 2009) and it has been shown that under arid conditions, apple roots concentrate under drip emitters, whereas roots of microjet-irrigated trees are more widely distributed over the soil volume (Neilsen et al. 2000). Furthermore, there may be considerable functional variability across the apple root systems (Green and Clothier 1999). In addition, the impact of water stress depends on the rootstock genotype. In apple crops, highly drought tolerant and sensitive rootstocks have been described (Atkinson et al. 1998; Lakso 2003).

Nitrogen is required to support the growth of new tissues. Compared to many other crops, the annual nitrogen requirements of fruit trees are relatively small: in the case of apple trees, 100-120 kg N/ha, for about 45 to 50 t/ha apples (Greenham 1980; Cheng and Raba 2009). These estimates correspond to whole nitrogen budgets according to the principles of Neilsen and Neilsen (2003). Few studies have been undertaken on fruit tree roots but they suggest that nitrogen supply could vary widely since root length density ranges from 525 to 1234 m/m³ in apple rootstocks (Ma et al. 2013).

Furthermore, nitrogen uptake could be mainly located in the first 20 cm of soil depth in which the root system seems to be more frequently distributed (Ma et al. 2013) and where nitrogen mineralization occurs. The rooting densities of apple trees are smaller than those of *Graminaceae* species with which they compete (Neilsen and Neilsen 2002), especially at the interface of tree rows and alleys.

Nitrogen supply may have a positive effect on the carbon source-sink balance and therefore on fruit production. As leaf and whole tree photosynthetic capacity is improved by nitrogen supply, the leaf area to fruit ratio increases, leading to more cells per fruit and to larger fruits (Xia et al. 2009).

Concerning soluble sugars in fruit, the accumulation of sugars slightly increases with higher N supply as a result of the improved supply of carbon to fruit or starch degradation (Xia et al. 2009). According to Raese (1998), repeated applications of mono-ammonium phosphate or N-P-K fertilizers may induce fruit disorders and a lower soil pH, while fertilizers such as calcium nitrate $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$ improve fruit color and firmness. High nitrogen application could diminish fruit color and decrease fruit firmness at harvest and during storage since it increases fruit internal ethylene and respiration (Fallahi and Mohan 2000; Fallahi et al. 2002; Xia et al. 2009). System experiments conducted in Washington State (Peck et al. 2006), which compared organic, integrated and conventional cropping systems, showed higher fruit firmness under organic management, where the only source of nitrogen was from cover crop legumes. Contradictory effects of nitrogen nutrition on fruit acidity have been reported (Etienne et al. 2013). Regarding nitrogen concentration in fruit, which may be important for apple wine and cider processing (Alberti et al. 2011; Kelkar and Dolan 2012), Toselli et al. (2000) showed a positive effect of nitrogen applied at bloom, probably because fruit in the first stages of its growth successfully competes with other tree organs for nitrogen accumulation.

Nitrogen management must be correctly driven according to nitrogen uptake and to nitrogen reserve remobilization in order to create compromises with possible nitrate water-pollution. Many single-dose or premature spring fertilizer applications may not be efficient if the temperature conditions prohibit nitrate absorption by the roots. Furthermore, during early spring, nitrogen uptake may be inhibited by nitrogen reserve remobilization that occurs at the same time; this makes early application of nitrogen ineffective (Neilsen and Neilsen 2002). In addition, this “extra” nitrogen can easily be leached after a heavy rain (Tagliavini et al. 1996). Agricultural practices such as fertigation may lower the quantity of applied nitrogen compared to broadcast applications (Neilsen and Neilsen 2003), thus contributing to lower leaching (Klein et al. 1989). Other practices such as foliar nitrogen spraying may also have the benefit of controlling the timing of nitrogen supply and potentially

reducing the total inputs and losses to the environment, since nitrogen is more directly absorbed by leaves.

Regarding the service of fruit production in terms of quantity and quality, the choice of indicators (Tab 1.1) is quite straightforward because standards have been developed for the fruit supply chain and in the horticultural literature. Yield is classically used to describe the production in terms of quantity of any crop in multiple service assessment (Dale and Polasky 2007; Kragt and Robertson 2014; Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014). The five quality criteria cited below can be assessed at the plot scale using mean values at harvest, given that the spatial variability of fruit quality is large (Génard and Bruchou 1992; Taylor et al. 2007). These criteria cover the concerns of various stakeholders, from fruit growers to consumers. Fruit mass is a convenient proxy because it is both a component of yield and the basis to calculate fruit size and fruit size classes that correspond to market standards. Color grades, titrable acidity and total soluble solids are standard organoleptic criteria widely used for fruit crops (e.g., Ebel et al. 1993; Mills et al. 1994; Mpelasoka et al. 2001; Reganold et al. 2001; Peck et al. 2006). Firmness is used worldwide (e.g., Mpelasoka et al. 2001; Peck et al. 2006) as a gage of ripeness and, therefore, of fruit harvest.

Table 1.1: Ecosystem services indicators, units and references.

Ecosystem service	Indicator (unit)	References
Fruit production	Fruit mass (g)	Dale and Polasky 2007; Kragt and Robertson 2014; Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014
	Yield (t/ha)	
	Size (mm)	
	Color grade	
	Titrateable acidity (% of malic acid)	
Climate regulation through GHG mitigation	Soluble solids concentration (SSC) (%)	Kilili et al. 1996; Fallahi and Mohan 2000; Mpelasoka et al. 2001; Peck et al. 2006; Xia et al. 2009
	Firmness (N (newton) or kg/cm ²)	
	Cumulative denitrified nitrogen (kg N ₂ O-N/ha/unit time)	
	C sequestered in soil and tree (kg C/ha/unit time)	
Soil nitrogen availability	Cumulative amounts of CO ₂ emitted by agricultural operations (kg C/ha/unit time)	Page et al. 2011; Wu et al. 2012; Zanutelli et al. 2015
	Soil organic nitrogen variation(kg N/ha/unit time)	Quiñones et al. 2007
	Mean, maximal and minimal soil nitrate concentration over a time period (mg NO ₃ -N/kg of dry soil)	Glover et al. 2000
Water cycle regulation and maintenance	Mean water content in different soil depths(g H ₂ O/100g of dry soil)	Syswerda and Robertson 2014
	Water drainage (mm/unit time)	Kragt and Robertson 2014
	Concentration of nitrates in drained water (mg NO ₃ -N/l)	Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014
	Concentration of pesticides in drained water	Loewy et al. 2003; Mottes et al. 2014
Pest and disease regulation	Rates of predation by natural enemies, rates of parasitism by parasitoids	Dib et al. 2010; Boreau de Roince et al. 2013; Maalouly et al. 2013; Monteiro et al. 2013; Maalouly et al. 2015
	Level of injury severity % fruit loss or % leaf loss or LAI loss	
Pollination	Indicators or models to assess the environmental impact of pesticides	(Gutsche and Rossberg 1997; Bockstaller et al. 2008)
	Abundance and diversity of pollinators	(Nicholls and Altieri 2013)
	Number of seeds per fruit	(Volz et al. 1996; Stern et al. 2001a; Garratt et al. 2014)
	% of fruit set	

2.2 Regulation and maintenance services

2.2.1 Climate regulation: mitigation of greenhouse gas emissions

There are limited references to greenhouse gas emissions and mitigation in orchards in the literature. Denitrification and carbon sequestration in trees and soil, which is a function of carbon assimilation and allocation (Fig. 1.4), are two important ecosystem functions in this respect. Denitrification is the process by which nitrates are reduced to nitrous oxide (N_2O), a greenhouse gas of which 87% is emitted by agriculture (CITEPA 2016). Denitrification depends on the physical and chemical conditions of the soil (organic matter, texture, density, pH, temperature and humidity), on climate (rainfall and temperature) and on agricultural practices (Hénault et al. 2013). Consequently, N_2O emissions are subject to high variability in time and space; at just a few centimeters distance, emissions can vary one-hundredth fold. In orchards, irrigation systems such as surface drip irrigation may enhance denitrification because of an anoxic waterlogged bulb created under the distribution tubing. Heavy rains during summer - when soil humidity is already maintained at field capacity – enhance this anoxic waterlogged bulb. This probably explains the higher emissions of N_2O observed under drip irrigation ($1.6 \pm 0.7 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) compared to microsprinkler irrigation ($0.6 \pm 0.3 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) in almond orchards (Alsina et al. 2013). Moreover, it has been shown that subsurface drip irrigation reduced N_2O emissions compared to surface drip irrigation in olive orchards (Quiñones et al. 2007). Furthermore, cropping systems using legume-based nitrogen inputs generally have lower net N_2O emissions than cropping systems that rely on synthetic nitrogen fertilizer inputs (Jensen et al. 2012). Ammonia fertilizers have a greater positive impact on denitrification than other types of mineral fertilizers (Zhu et al. 2013) and fertigation may increase denitrification (Riga and Charpentier 1999). The production of N_2O may also be exacerbated by incorporating material with a low C/N ratio (Baggs et al. 2000). Since denitrification is promoted by low O_2 concentrations that typically occur in wet soils, an increase in macroporosity in the top 50 mm decreases N_2O production (Deurer et al. 2009). In orchards, there is experimental evidence that agricultural practices such as the use of cover crops reduce herbicide use or, in the case of organic orchards, that green-waste composts favor soil macroporosity in comparison to conventional orchards where mineral fertilizers, herbicides and drip-irrigation are used (Deurer et al. 2009).

It can be noted that the use of one technique for mitigating N_2O emission could jeopardize the mitigation of another GHG emission. For example, using mechanical weeding may increase macroporosity and, as such, decrease N_2O emissions while at the same time increasing CO_2 emissions by using agricultural engines that run on fuel.

Between 400 and 800 Mt carbon per year could be sequestered worldwide in agricultural soils by implementing appropriate management practices including the increased input of crop residues, reduced tillage and dead wood recycling (IPCC 1995; IPCC 2003). The prevailing opinion is that the contribution of orchards to carbon sequestration is negligible. This opinion refers in large part to the small area that orchards represent in relation to forests and to low tree height in orchards - 3 to 4 meters on average, compared to 15 meters for deciduous forests in temperate regions (Luyssaert et al. 2007). It is nevertheless important to estimate the contribution of orchards, especially in regions where they are highly concentrated. Studies have shown that fruit orchards such as kiwifruit, apple, peach and olive could sequester from 2.8 to 5 t C/ha/year (Sofo et al. 2005; Page et al. 2011). This is six times less than forest stands, e.g., *Pinus radiata* stands (Page et al. 2011). However, orchards may sequester quantities of carbon similar to those of forests during their first years of life since photosynthesis activity is greater in young trees than in older ones (Wu et al. 2012). In addition, pruning, which is intensively used in orchards, helps increase photosynthesis rates. Furthermore it has been found that fruit trees have relatively low respiration rates compared to many other plants due to the low construction costs of fruit (in the case of apple trees: Lakso et al. 1999; Zanutelli et al. 2013). This may lead to less carbon loss through respiration in the overall carbon cycle system. Zanutelli et al. (2013) compared the net primary productivity of a natural woody ecosystem of temperate-humid biomes to that of an apple orchard. They showed that the carbon fluxes (gross primary production, net ecosystem productivity and ecosystem respiration) were quantitatively similar in both cases. The organic carbon produced yearly in the whole tree can reach up to 8.54 t C/ha at harvest. It is allocated to the different apple tree organs as follows: 50% to fruits, 13% to leaves - compared to 30% for deciduous forests, 23% to aboveground wood, 2% to belowground wood, and 12% in fine roots (Zanutelli et al. 2013; Zanutelli et al. 2015). Crop load, planting pattern, training system, rootstock choice and water and nitrogen stress may heavily impact this allocation.

In a carbon balance approach, it is important to consider carbon losses. Mechanical or chemical weeding operations as well as irrigation could increase carbon mineralization in orchard soils, creating carbon loss by heterotrophic respiration of microorganisms. Furthermore, in most cases, carbon in fruit trees is only temporarily sequestered since the lifespan of an orchard ranges from 15 to 30 years and the trees are usually burned without any valorization at the end of their lives. Lifecycle analyses show that carbon emissions may also come from other sources: CO₂ emissions by engines during weeding or fertilization might represent as much as 23% of total CO₂ emissions in intensive apple orchards (Page et al. 2011). It is therefore important to precisely quantify these losses.

Agricultural management of potentially recyclable elements of orchards such as pruning wood, mowed grasses or senescent leaves (in the 'groundcover management' box in Figure 1.4) may help close the carbon biogeochemical cycle. Carbon content and humus production from the decomposition of senescent leaves and pruning material have been measured in young and mature peach and olive orchards. These studies have demonstrated that significant amounts of carbon are sequestered in this way, considering the Mediterranean fruit production surface (Sofo et al. 2005). The use of cover crops, brassica seed meal and especially wood chips increases the quantity of humus in orchard soils, creating carbon storage within the soil. Soil carbon pools have a mean residence time of 12 years for wood chip groundcover (Teravest et al. 2011).

According to the above, indicators of denitrification and carbon sequestration would address the climate regulation service in orchards in a complementary manner (Tab. 1.1). Quantification of denitrification is hindered by high spatial and temporal variations (Groffman et al. 2006). Because of this temporal variation, cumulative amounts of denitrified nitrogen over key periods have been proposed for orchards (Kramer et al. 2006). More globally, cumulative amounts of denitrified nitrogen could be used over appropriate time scales, depending on the objective of the study. The most commonly applied method to measure denitrification is based on the ability of acetylene (C_2H_2) to inhibit the reduction of N_2O to N_2 (Groffman et al. 2006). In the presence of C_2H_2 , N_2O becomes the terminal product of denitrification, which can then be quantified by measuring N_2O production. However, it is now well established that the acetylene inhibition method underestimates denitrification under aerobic incubation conditions (Butterbach-Bahl et al. 2013) and that it is better to use other methods. N_2O efflux can also be measured using a static chamber method (Folorunso and Rolston 1984; Matson et al. 1996). Some denitrification measurements have been made using methods based on labeled ^{15}N (Myrold 1990). Similarly, the quantities of carbon sequestered in the soil and in different tree organs at specific time scales have been used as indicators in orchards (Page et al. 2011; Wu et al. 2012; Zanotelli et al. 2015). For these measurements, tree excavation is generally required measure of each organ's biomass and closed gas exchange systems (e.g., Licor photosynthesis system with soil CO_2 flux chamber) are necessary to measure CO_2 emissions from the soil. Measurement chambers are generally an obstacle to farm machinery. In Zanotelli et al. (2015), soil respiration measurements were therefore conducted in a parallel independent trial. Syswerda and Robertson (2014) have used a more sophisticated and data-intensive method that combined these basic indicators and other parameters to calculate a global warming impact. This impact was calculated on a multiannual scale for 20 years by combining the net global warming impact of soil carbon sequestration, agronomic nitrogen fertilizer application, lime application, fuel usage, nitrous oxide emissions, and methane (CH_4) oxidation for each of the studied systems. In view of this type of

study, indicators of the direct impact of agricultural practices in terms of CO₂ emissions are necessary. Cumulative amounts of CO₂ emitted by crop protection products or engines operating in the orchard over the growing season can serve as a simple indicator (Page et al. 2011; Alaphilippe et al. 2013)

2.2.2 Soil nitrogen availability

Nitrogen availability for nitrogen uptake by plants is the difference between the inputs of mineral nitrogen, i.e., mineralization of fresh organic matter and humus, fertilization and nitrogen fixation, the losses caused by leaching, volatilization and denitrification, and the immobilization of nitrogen caused by humification (Fig. 1.4; see Section 2.2.1 for denitrification). These different functions have been extensively described in a generic manner (Calvet 2003; Bot and Benites 2005; White 2006). Regarding orchards, the impact of techniques that act on soil biological activity, which largely contributes to functions that deliver nitrogen, deserves attention. Studies in apple orchards have shown higher biological activity, which is able to enhance mineralization, for organic systems that use cover crops, groundcovers and composts than for conventional ones that use more herbicides and mineral fertilizers (Tagliavini et al. 2007; Hoagland et al. 2008; Teravest et al. 2011). Similarly, the frequent use of cover crops in orchards may significantly increase the abundance and activity of fungi and bacteria that enable humification (Six et al. 2006) since they present high C/N ratios. Biological nitrogen fixation by legumes such as white clover (*Trifolium repens*) in the ground vegetation of orchards may also be a source of nitrogen input to the system. Some figures have placed biological nitrogen fixation in soil within a range of 118 to 126 kg N/ha over a period of two years in apple orchards, depending on the clover biomass production and ground vegetation management practices (Goh et al. 1995). The difficulty lies in the quantification of the potential nitrogen released from these legumes, especially because other nitrogen cycle functions tend to be inhibitory to symbiotic nitrogen fixation. For example, an excess of nitrate after mineral fertilizers application can create favorable conditions for denitrification (Haynes and Goh 1980), which inhibits nitrogen fixation in the soil.

Soil nitrogen may be loss-driven in fluid forms through leaching. Kramer et al. (2006) placed the amounts of nitrogen leached annually in apple orchards within a range of 68 µg of NO₃-N at a depth of 100 cm in organic systems, to 1092 µg NO₃-N at a depth of 100 cm in conventional systems fertilized with calcium nitrate. Managing these disservices is difficult, since it is generally the soil texture and structure as well as the climatic conditions that impact nitrogen leaching. However, leaching can be reduced by fractioning nitrogen inputs throughout the year and using cover crops in the alleys. The minimization of nitrogen leaching in orchards must be based on reducing the

presence of NO_3^- ions at the end of the vegetative period (late autumn) since the major risk of water contamination with leaching occurs during winter and in early spring (Tagliavini et al. 1996).

Volatilization occurs when nitrogen is lost in its gaseous form, ammonia. These losses depend on soil conditions (pH, cation exchange capacity, porosity), climatic conditions and type of manure spreading. The percentage of nitrogen lost by volatilization in olive orchards receiving 204 kg N/ha/year was estimated at 1.8% over 7 days, with much higher losses a few hours after application than a few days later (Fernández-Escobar et al. 2012). A proportion of the volatilized nitrogen can be absorbed by the tree, especially by leaves. Boaretto et al. (2013) showed that leaf absorption of $^{15}\text{NH}_3$ volatilized from fertilizer was higher in a high planting density system (7 %) than in a standard planting density (3 %) in orange orchards.

Nitrogen “recycling” by leaf and pruned wood restitution to soil makes it possible to close the nitrogen cycle by using the aboveground biomass production. Labeled nitrogen experiments conducted on apple trees showed that the amount of nitrogen derived from leaf litter and taken up by trees over a 2-year period averaged 713 mg nitrogen per tree, which represented 16% of the nitrogen originally contained in the leaves that had returned to the soil (Tagliavini et al. 2007).

To describe soil nitrogen availability in orchards (Tab. 1.1), both soil organic nitrogen content and soil nitrate concentration, which indicate long- and short-term nitrogen availability, respectively, should be considered. In addition, as a matter of principle, one should consider dynamics. The time window depends on the objective of the study. The detailed dynamics are informative (see Quiñones et al. (2007) for an example in orchards) but they need to be summarized by a few statistics for ecosystem service studies. For organic nitrogen content, a variation rate over the chosen time window would be relevant because it describes a balance. For nitrate concentration, minimal, maximal and mean values are classically used to summarize a dynamic series (Glover et al. 2000). Concentrations at key periods of plant development and growth could also be used. Total nitrogen and $\text{NO}_3\text{-N}$ soil concentrations in different soil layers are assessed by routine soil analyses in orchards. Alternatively to soil nitrate concentration, simulation studies of multiple ecosystem services in agroecosystems have used nitrogen mineralization as a proxy for plant nitrogen availability. It is the case of Schipanski et al. (2014) who averaged daily values of net nitrogen mineralization over several rotation cycles of annual crops, and of Kragt and Robertson (2014) who used the same proxy on a yearly basis for mixed crop-livestock systems.

2.2.3 Water regulation : hydrological cycle and water flow maintenance

According to the CICES, water regulation services correspond to the capacity to maintain baseline flows for water supply and discharge. As in the case of soil nitrogen budget, the ecosystem functions implied in the classical water balance approach, evapotranspiration, infiltration and runoff (Fig. 1.4), and their dependence on soil and water conditions are well known, whereas the characteristics of orchards imply specificities. Evapotranspiration is modified by orchard architecture depending on the planting pattern and the training system which impact water vapor diffusion resistance (Lakso 2003). Covering trees with nets may impact evapotranspiration (Bastías et al. 2011) in addition to the planting pattern and the training system. Vaissière et al. (2000) showed that the atmospheric relative humidity increases by 1 to 4% within hail nets. Various operations act on infiltration and runoff. First, in orchards with late cultivars, harvest operations could be detrimental to infiltration because harvest takes place at periods during which the soil can be humid and, therefore, more sensitive to wheel traffic and soil packing. Second, within-row and inter-row soil management are particularly important. In the orchard rows, pre-emergence herbicide use, which is very common, creates bare soil, thus decreasing infiltration and increasing runoff (Merwin et al. 1994). The presence of a groundcover in alleys is a characteristic feature of orchards, although it is not systematic. Oliveira and Merwin (2001) have shown that the infiltration rate was higher on shredded hardwood bark mulch systems since they confer a better floor anchoring and increase permeability through organic matter and macrofauna. In avocado orchards, mixtures of ryegrass and clover increase soil organic matter due to groundcover residues and rhizosphere decomposition (Atucha et al. 2013), thus preventing runoff. However, in mowed grass groundcovers, tractor wheel traffic during mowing could significantly reduce infiltration (Becerra et al. 2010). Nevertheless, it has been reported that groundcovers in orchard alleys decrease yield and tree growth due to nutrient and water competition between grasses and fruit trees (Robinson and O’Kennedy 1978; Atucha et al. 2013). This could be corrected via appropriate fertilization and irrigation management, or by applying a new technique known as the “sandwich”, which consists in tilling the soil on both sides of the row while leaving a thin strip of groundcover on the inter-row (Schmid and Weibel 2000). The sandwich technique has the advantages of the cover crop in alleys while eliminating the effect of competition from weeds (Garcin et al. 2012). Thus, it may also reduce the reliance on herbicides that has detrimental effects both on soil properties (see above) and on the quality of water at a large scale through runoff.

Decreasing the quantity of water diverted to agriculture, which exceeds 70–80% of the total in arid and semi-arid zones (Fereres and Soriano 2007), is a key issue. Modern irrigation scheduling concepts have been implemented for this purpose in orchards. Micro-irrigation methods such as micro-aspersion or drip irrigation are frequently used, usually controlled by tensiometers. In limited-water

regions, fruit growers are now using techniques that require less water without affecting the functioning of the crop. These techniques, which go under the name of 'regulated deficit irrigation' (Chai et al. 2016), are largely based on a balance between a better use of soil water, more specifically considering the soil water reservoir, together with punctual evapotranspiration reductions at specific stages of tree development.

Classical indicators of hydrological cycle components are available and have been widely adopted (e.g., Pistocchi et al. 2008). Two indicators of the water regulation service are relevant for orchards: drainage and soil water content (Tab. 1.1). They are particularly employed in multi-service studies in agroecosystems. Cumulative values of drainage per year have been taken as a proxy to water regulation by Kragt and Robertson (2014). Soil water content, which is indicative of soil water availability for plants, was used by Syswerda and Robertson (2014). As in the case of soil nitrogen availability, seasonal variation should be dealt with using summary statistics or values at key periods that depend on the purpose of the study. Syswerda and Robertson (2014) used soil water content in July, the most water-limited time of the growing season in the conditions of their study. Soil water availability can be monitored by tensiometers that measure the soil water tension (bar) or by capacitance probes that indicate soil water status (in mm). In addition to these quantitative components, water quality that can be seriously impaired by the use of fertilizers and pesticides should be considered (Tab. 1.1). The concentrations of nitrates and pesticides in drained water could be targeted since they are standard indicators used to control the application of regulation policies such as the Water Framework Directive in Europe. Nitrate concentrations in drained water have been used in multi-service studies in agroecosystems (Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014). In the case of orchards, the autumn period, after fruit harvest, is a relevant time for these concentrations. Nitrogen leaching can be measured by ion exchange resin lysimeters, as described by Susfalk and Johnson (2002), but it remains difficult to evaluate nitrogen leaching at the plot scale.

2.2.4 Pest and disease control

The perennial character of orchards poses a great pest management challenge, since the various organs of the tree structure provide multiple suitable habitats for arthropod colonization (Beers et al. 2003). At the same time, apple trees host the agents of over 70 infectious diseases (Grove et al. 2003), including bacteria and fungi. These agents cause injuries to the leaves, fruits, branches and twig organs of the tree. In orchards, since most of the production is intended for the fresh product market, damage to fruits is highly prohibitive for future sales and may negatively impact the fruit grower's income. The occurrence and abundance of pests and diseases depends on biotic

interactions such as predation, on species' niches of and on habitat availability, as well as on dispersal.

The economic value of pest predation is more easily estimated than many other services (Power 2010) since it is possible to directly substitute insecticides with ecosystem services provided by natural enemies. It was estimated that the control of native herbivores by insects led to a savings of 4.49 billion dollars per year in the United States, based on projections of losses that would accrue if insects were not functioning at their current level and assuming that 33% of pest control is attributable to insects (Losey and Vaughan 2006). The question is which conditions may favor the control of pests by natural enemies in orchards.

Beneficial insects require plant resources for habitat supply. Plants serving as alternative hosts for a parasitoid or predator of the target crop pest are known as 'banker plants' (Frank 2010). Complex landscapes with a high density and connectivity of uncultivated, perennial habitats that included banker plants have shown an increase in natural enemy populations (Thies 1999). Such landscapes are encountered in orchard areas (Schäckermann et al. 2015). The permanency of the orchard system which enhances stability and resilience, multi-strata design and the presence of hedgerows, are likely to favor natural enemy populations (Simon et al. 2010). For example, a short groundcover in apple orchard alleys may favor the abundance and predatory behavior of the general predator *Forficula pubescens* (Marliac et al. 2015). The composition of the groundcover may also have an influence. Flowering plants such as sweet alyssum (*Lobularia maritima*) have shown a significant attraction potential for natural enemies leading to the suppression of woolly apple aphid (*Eriosoma lanigerum*) populations (Gontijo et al. 2013). Wildflower strips are more controversial, since some studies have shown encouraging results on aphid predator enhancement using wildflower strips in apple orchards (Wyss 1995; Boller et al. 2004; Pfiffner et al. 2013), while others do not show any significant enhancement of aphid predators (Balzan et al. 2014). Hedgerows, especially mixed ones, have been shown to significantly increase the predation rate by providing shelter to natural enemies (Debras et al. 2011; Miñarro and Prida 2013). The efficiency of phytoseiid predators such as *Amblyseius andersoni*, *Kampimodromus aberrans*, and *Neoseiulus californicus* for the regulation of apple red mites (*Panonychus Ulmi*) has been demonstrated in many studies, most of which are reviewed in Ricard et al. (2012). The cessation of acaricide treatments to control red mites preserves these predators, as do semi-natural environments with dense, high and diversified hedges or groves.

Enhancing habitat supply to the natural enemies of pests may be useless if pesticides are still used as a loophole. Pest management is still highly dependent on pesticides in orchard, because of strict market quality requirements. Many studies have proven the negative effect of pesticides on natural

enemies of pests (Biddinger and Hull 1995; Biddinger et al. 2013; Cumming and Spiesman 2006; Flexner et al. 1986; Pekár 1999). Monteiro et al. (2013) and Vasseur et al. (2013) have shown that pesticides may affect the rate of pest predation within 100 m wide buffers around the targeted orchard and that drift during pesticide applications may affect natural enemies in the surrounding hedgerows.

Other orchard management practices that consist in introducing ‘planned’ plant biodiversity may initiate ecological processes linked to the niche and dispersal of pests. This is the case of push stimuli processes that can be performed through companion planting of repellent plants that emit natural chemical substances (Parolin et al. 2012). Cover crops in alleys with aromatic plants such as *Centaurea cyanus*, *Saturela hortensis*, and *Agerarum houstonianum* in pear orchards can reduce the numbers of herbivore pests while increasing the abundance of predators and parasitoids (Song et al. 2010). The choice of aromatic plants to enhance pest control nonetheless requires in-depth research on the aromatic chemical compounds of plants. Other plants known as trap plants are, by definition, more attractive to pests than cultivated crops, thus limiting pests to a particular area where they can be easily controlled by traditional methods (Parolin et al. 2012). They are used in the push-pull strategy of pushing away a pest from a repellent plant and attracting it to the border of the cropped field using trap (“pull”) plants (Ratnadass et al. 2012). In addition, fruit trees provide resources for pests. Direct modifications of the host plant driven by agricultural practices may help decrease pest populations. For example, in peach orchards, decreasing pruning intensity may lower the degree of green peach aphid (*Myzus persicae*) infestation due to the decrease in the proportion of growing shoots on which aphids develop much better than on short shoots (Grechi et al. 2008). Similarly, in apple orchards, rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*) infestation significantly decreases when the degree of branching, which can be modified by tree training, increases. The underlying hypothesis is that the number of crossroads related to the branching degree affects the probability of reaching the target resource (Simon et al. 2012).

Apple diseases such as apple scab (*Venturia inaequalis*) and powdery mildew (*Podosphaera spp.*) may be managed using control methods that could avoid the eight to ten fungicide applications per season (Grove et al. 2003) or more (MAAF, 2014). Genetic control is the most important lever to managing diseases. Many genes that confer resistance to *Venturia inaequalis* have been identified for apple (Brun et al. 2007). Over 50 scab-resistant cultivars have been released and are gaining in commercial acceptance, while other horticultural characteristics are being simultaneously improved (Grove et al. 2003). A breakdown of the resistance coded by Vf, the most frequently used resistance gene, has been found (Parisi et al. 1993a). This makes it urgent to diversify the sources of resistance to apple scab and to define new breeding strategies.

Mitigating apple scab infection via the plant itself is possible through different agricultural practices. Leaf wetness is important for apple scab, as demonstrated by the fact that leaf wetness duration together with air temperature are used to assess the level of risk of the disease (Mills and LaPlante 1951). Simon et al. (2006) make the hypothesis that training systems such as centrifugal training, which have a positive impact on light interception (Willaume et al. 2004), lead to a higher degree of aeration within the trees, thus shortening the wetness periods that lead to scab infection. Concerning irrigation systems, foliage aspersion can favor foliar wetness, creating ideal conditions for apple scab development and secondary contamination by conidia (Olcott-Reid et al. 1981). Irrigation under foliage is strongly preferred nowadays.

Actions on the inoculum or on the pathogen dispersal enable good control of the apple scab infection. It has been shown that sanitation practices such as leaf litter removal considerably reduce the number of fruit scab lesions at harvest (approximately 70%) (Gomez et al. 2007), conversely decreasing the food stock for the soil detritus cycle (Zanotelli et al. 2015). Didelot et al. (2007) showed that within-row mixtures of resistant and susceptible cultivars were effective in controlling apple scab because they reduced auto-infection, which is important in the apple tree. Autoinfection is defined as infection caused by a propagule within the same genotype unit. In the case of a within-row mixture, the transmission of apple scab conidia from one tree of a susceptible cultivar to another tree of the same cultivar was limited, on the one hand, by the barrier effect due to the presence of a resistant tree between both and, on the other hand, by the fact that the distance between both was large in relation to the spatial extent of propagule dispersion.

According to these examples, plant and insect biodiversity – as well as agricultural management which does not necessarily directly target pests but acts via the tree or environmental conditions – enhance ecological pest control. Even though the ‘common’ strategy still relies on pesticides, fruit growers are becoming aware of these ecological strategies that can be combined in order to optimize pest regulation for low environmental impacts and efficient protection. They constitute an essential element of Integrated Pest Management or IPM (Barzman et al. 2015) that is now mandatory for all crops in the EU member states (European Parliament 2009).

Various indicators of pest and disease control have been proposed in the literature, including in studies of multiple agroecosystem services. Syswerda and Robertson (2014) have used plant diversity to indicate the delivery of biological control and, more generally, arthropod habitat and other conservation benefits. It actually seems that they dealt with plant diversity as a proxy to habitat provision, as in Tsonkova et al. (2014). Schipanski et al. (2014) used lepidopteran and carabid activities as proxies to pest suppression and beneficial insect conservation, respectively. These

indicators are fairly distant from the service in question. The same comment applies to the abundance or diversity of natural enemies that has also been used. The enhanced populations of natural enemies in crops provide no guarantee for effective pest control, according to the review of Bianchi et al. (2006). Many studies dealing with insect pest suppression by natural enemies in orchards have considered rates of predation by natural enemies (e.g., Boreau de Roince et al. 2013; Monteiro et al. 2013; Tab. 1.1), rates of parasitism by parasitoids (e.g., Maalouly et al. 2013; Maalouly et al. 2015; Tab. 1.1) or rates of parasitism that combine the two processes (e.g., Dib et al. 2010). However, pest suppression is not pest control and there is a need to fill the gap between natural pest control, crop damage, and crop yield (Schellhorn et al. 2015). In addition, the above-mentioned indicators of pest suppression are less suitable for diseases than for animal pests, and they only deal with top-down effects, excluding bottom-up regulation forces. We propose to alternatively consider fruit, shoot or leaf injury with a degree of cumulative injury severity at harvest. This type of indicator can be easily linked to damage at harvest and is commonly used in orchards. It should be noted, however, that in practice, the degree of injury severity may depend not only on the ability of orchards to ecologically control pests and diseases but also on the action of pesticides. Decoupling these effects is possible experimentally or by modeling, and even in observational studies provided that additional indicators such as the level of pesticide use are available. In addition, indicators of the environmental impact of pesticides are necessary. Specific pesticide indicators or ecotoxicological models have been proposed for this purpose (Gutsche and Rossberg 1997; Bockstaller et al. 2008; Tab. 1. 1).

2.2.5 Lifecycle maintenance: pollination

Pollination, the value of which has been estimated at €153 billion (Gallai et al. 2009), is an essential driving force of crop production. This general statement applies to fruit crops, even though pollination may sometimes be negatively perceived by some stakeholders. This is the case of citrus fruit growers (particularly tangerine and mandarin orange) in which seeds develop in the case of cross-pollination, whereas seedlessness is an important quality characteristic of these fruits (Sykes 2008; Sagoff 2011).

Many fruit varieties are not self-pollinating. Insect pollination services are provided both by wild, free-living organisms (chiefly bees, but also many butterflies, moths, flies, beetles and wasps), and by commercially managed bee species (primarily the honey bee, *Apis mellifera*) (Kremen et al. 2007). A minimum of four or five strong colonies per hectare is recommended during the bloom period in mature apple orchards (Dennis 2003). A greater species richness of pollinators may favor fruit set and apple growers could economically benefit from relying on wild bees for pollination. For example,

Osmia cornuta, an alternative pollinator, has a greater tolerance to inclement weather and a higher rate of stigma contact than *Apis mellifera* in fruit crops (Ladurner et al. 2004).

In orchards, the positive effects of cover crop and hedgerow species richness on the rate of pollination have been demonstrated (Miñarro and Prida 2013; Nicholls and Altieri 2013; Rosa García and Miñarro 2014). This is in accordance with the fact that most pollinator species depend on several floral resources (Miñarro and Prida 2013). The spatial organization of orchards in the landscape in relation to natural habitat is also important since it has been shown that fields situated 1.5 km away from natural habitat patches can be expected to contain only 50% of the pollinator diversity of the fields closest to these patches (Ricketts et al. 2008).

Pesticides may impair bee colonies, especially honeybees, in terms of learning performance, behavior and neurophysiology, thus decreasing pollination (Thompson 2003; Desneux et al. 2007). In addition to pesticides, hail nets, which are very common in orchards, may also influence pollination through the decrease in bee colony weight, which is due, in the first place, to forager deaths in the nets and, as a consequence, to swarm death (Vaissière et al. 2000). There is obvious antagonism between pollination and pest regulation through pesticides and enclosure nets, which could be overcome by relying more on biological pest control, as seen in Section 2.2.4.

Indicators of pollination (Tab. 1.1) are still in debate (Vaissière, pers. comm.). Similarly to the case of pest and disease control, the pollination value of an agroecosystem can be related to plant diversity. On these bases, Ricou et al. (2014) proposed a vegetation-based indicator of the pollination value of field margin flora using floral traits. The abundance and diversity of pollinators, i.e., of the “service providers”, have also largely been highlighted (e.g., Nicholls and Altieri 2013). Although they are not direct indicators of pollination, all these proxies are useful with respect to pollination in the orchard in general, but as far as the fruit trees are concerned, direct indicators that can be measured or modelled could be mobilized. Fruit set and the number of seeds per fruit (for multi-seeded fruits) are common indicators of the efficacy of pollination in orchards (Volz et al. 1996; Stern et al. 2001b; Garratt et al. 2014). However, fruit set should be considered with caution and not alone, because pollination is not the only determinant of fruit set.

3. Assessing and analyzing multiple ecosystem services in orchards

There are few studies on the assessment of multiple ecosystem services in agroecosystems (Antle and Capalbo 2002; Heal and Small 2002; Lescourret et al. 2015). In the following paragraphs, we

propose a two-fold approach to multiple ecosystem service analysis in orchards: using models to quantify indicators of ecosystem services, and exploring their mutual relations.

3.1 Using models to quantify indicators of ecosystem services and their connections

As stated above, the relationships between agricultural management, ecosystem functions and ecosystem services present a high degree of complexity. That is why using models can be of great assistance to analyze these relationships. Models can provide a direct quantification of ecosystem service indicators such as those proposed in Section 2, or of indicators of ecosystem functions at a given space and time scale. In addition, they make simulation of changes in ecosystem service profiles and relationships possible according to a large panel of fictive scenarios. There are growing numbers of model-based ecosystem service simulation studies. Thus, Kragt and Robertson (2014) analyzed the impact of various agricultural practices on ecosystem services of farm systems in a maize belt in Western Australia with APSIM, a model that simulated biophysical processes in a crop-pasture system (Keating et al. 2003). They showed that increasing crop residue retention can jointly increase production value and improve soil carbon and nitrogen supply. Conversely, increasing the use of perennial pastures in the farming mix creates negative trade-offs between production values and non-marketed ecosystem services. Another example is the simulation study of Tsonkova et al. (2014) using a model called the 'Ecosystem Services Assessment Tool for Agroforestry' (ESAT-A), which was designed to compare ecosystem services provision in different agroforestry management situations. According to this simulation study, the provision of habitat, soil fertility, water quality and regulation, and erosion control were greater for alley cropping systems than for conventional agroforestry systems, and within alley cropping systems, the more that poplar tree proportions increased, the higher was the provision of ecosystem services.

STICS, a widely used dynamic model that simulates the soil-crop interactions at a daily time step (Brisson et al. 1998b; Brisson et al. 2009), could be a good candidate to represent agricultural production, climate regulation, soil fertility and water cycle regulation in response to agricultural management and pedoclimatic conditions in a unified framework. The main simulated ecosystem processes are crop growth and development, as well as the water and nitrogen balance of the soil-crop system. This model has already been used for ecosystem service analysis. Tribouillois et al. (2016) used STICS to analyze the effect of cover crops and green manuring on leaching and nitrogen fixation, respectively, and then on soil nitrogen availability. The generic character of STICS enables a parameterization of the model to many crops. It has already been parameterized on perennial crops such as grapevine (*Vitis vinifera*) (Garcia de Cortazar Atauri 2006) and silvergrass

(*Miscanthus*×*Giganteus*) (Strullu et al. 2014). However, STICS does not address the question of pests and diseases and their control, and it is necessary to supplement the model or to couple it with pest models to address the set of ecosystem services in Figure 1.4.

3.2 Analyzing multiple ecosystem service relationships

Ecosystem service relationships are very complex and often non-linear (Lescourret et al. 2015; Rapidel et al. 2015). They are commonly classified as synergies (positive relationships) and trade-offs, also referred to as conflicts (negative relationships). Trade-offs occur when the provision of one ecosystem service is reduced at the expense of another (Rodríguez et al. 2006). Relationships between ecosystem services may be explained by highlighting underlying ecosystem functions and/or the role of management drivers. Positive ecosystem services relationships may occur when a similar management lever acts on different functions that underpin the services (Bennett et al. 2009). Thus, pest and disease control and soil fertility are not functionally related to each other, but they may respond similarly to groundcover management. Adding organic material to the ground habitat of an apple orchard significantly affects arthropod abundance, leading to more predators and fewer herbivores (Brown and Tworkoski 2004). The physical qualities of mulch can affect apple aphid migration (Damavandian 2000). At the same time, nutrient release from the decomposition of this organic matter can enhance soil quality by increasing soil carbon, nitrogen and microbial biomass (Teravest et al. 2011).

In agroecosystems, agricultural production and regulating services are often in conflict. A conflict may occur when there is a common function, and the challenge is to find a management solution able to mitigate the conflict. For example, in vineyards, intercropping may mitigate runoff but decrease grapevine productivity in the event of competition between intercrops and the grapevine for resources. A simulation study using the VERDI model (Ripoche et al. 2011) suggested that, under irregular rainfall distribution, flexible intercropping management in vineyards can help overcome this trade-off. This flexible management consisted in maintaining cover crops with mowing and possibly destroying them when the available soil water in the field was lower than a reference value. Similarly, Guilpart (2014) studied the link between grapevine yield and regulation of fungal diseases through water stress at flowering. He has shown that decreasing vegetative growth (the common function) could enhance powdery mildew regulation but, at the same time, decrease yield. However, most of the year n yield is determined by year $n-1$ conditions, whereas grapevine vegetative development depends only on year n conditions. On this basis, he used simulation to show that when

specific climatic sequences occur (a wet year followed by a dry year), applying water stress during flowering could reduce vegetative growth without impacting yield, leading to a win-win scenario.

It may be difficult to identify a management lever able to mitigate the conflict between a provisioning and a functionally linked regulating service, in the case of multi-lever management acting on various functions, which is a very common situation. For example, Grechi et al. (2012) compared crop management strategies using a model of the peach-aphid pathosystem, in which, on the one hand, insecticides kill aphids, and, on the other, pruning or nitrogen supply impacts the architecture, growth and quality of vegetative organs and, consequently, yield, fruit quality and pest control by acting on aphid dynamics. The effect of insecticides on aphid mortality was evidently predominant, thus obscuring the potential effect of the other cultural methods on the relationship between provisioning and regulating services.

The analysis of two-sided relationships between ecosystem services with a small number of common functions and drivers is obviously limited. Comparing multiple ecosystem service provisioning across different types of agroecosystems generates global information on the way specific crop systems contribute to given profiles of ecosystem services. Syswerda and Robertson (2014) adopted this approach using data of long-term experiments in different cropping systems (annual grain and perennial plants such as alfalfa and hybrid poplar trees). They observed that perennial systems made a greater contribution to soil water storage and drainage than annual grains, except for no-till systems, which equally contributed to the provision of these two ecosystem services without losing yield. Within perennial systems, poplar seemed to deliver higher plant species richness than deciduous forests. Among grain systems, biologically-based systems delivered the highest number of ecosystem services in a favorable way, which is in accordance with the findings of Sandhu et al. (2008; 2010). Early successional systems were generally favorable to greenhouse gas emission mitigation, while poplar systems presented high provisioning of plant diversity, soil organic matter and nitrate conservation. Significant correlations between several ecosystem services were identified. The most significant positive correlation occurred between drainage and nitrate leaching, and the most negative one was between global warming impact and plant species richness.

4. Conclusions

This review demonstrates that orchards represent relevant situations for studies on ecosystem services trade-offs and synergies. Agricultural practices in orchards have a strong impact on several ecosystem functions and, consequently, on ecosystem service relationships. Groundcover

management may increase biotic interactions by offering a habitat to natural enemies or repelling crop pests, but it can also avoid runoff and leaching while increasing soil drainage. Pruning may increase fruit production but may favor some pests such as apple aphids as well. Pesticide use remains the most effective pest control method, but its negative impact on ecosystem services such as pollination jeopardizes the sustainability of orchard systems. Irrigation and nitrogen fertilization certainly allow increased fruit production, but they might impact non-marketed ecosystem services, since they have a direct effect on functions like leaching and denitrification.

It should be noted that knowledge gaps, that could hamper studies of ecosystem service relationships in orchards exist. Ecosystem services linked to the soil compartment have been studied in annual crop systems, but they remain poorly documented in orchards. Measurements on orchards are quite scarce or dispersed, particularly for carbon storage in tree organs and in soil, carbon loss in the atmosphere via respiration rates and CO₂ emissions from engines and crop protection products.

In addition, this review did not consider the entire range of ecosystem services and focused on the plot scale. Cultural services were not considered and are difficult to qualify, but they should not be neglected because fruit trees have esthetic and cultural values (Baumgärtner and Bieri 2006). Cultural services seem to be the poor relative of ecosystem service assessments (Fagerholm et al. 2016). We have addressed habitat provision, which is important for biodiversity conservation, with respect to pest enemies, but this issue may be addressed more globally and at the landscape scale. For instance, it has been shown that modifying the landscape structure by planting fruit trees may enhance the connectivity in various taxa (Baumgärtner and Bieri 2006).

Model-based simulations of a large range of cropping systems provide the foundation for analyzing ecosystem service trade-offs and synergies and for finding the desired combinations of ecosystem services (Rapidel et al. 2015) using multi-objective optimization (Memmah et al. 2015; Ould-Sidi and Lescourret 2011). However, models that consider multiple ecosystem service provision are lacking in the case of orchards. Fruit tree models and fruit tree pest-predator models were designed and used to analyze the effect of cropping systems (Grechi et al. 2012; Lescourret et al. 1999; Lescourret et al. 2010), but they ignored the soil compartment and addressed a limited range of ecosystem services. Therefore, developing more sophisticated orchard models that address multiple ecosystem services and take the impact of soil, climate and agricultural management into account is still a challenge. A similar comment was made by Fagerholm et al. (2016) for agroforestry systems.

The analysis of relationships between agricultural practices and multiple ecosystem services can be useful for the design of innovative orchard systems that optimize the provision of multiple ecosystem services for a large panel of stakeholders. This design will of course require a strong stakeholder

involvement (Fagerholm et al. 2016) and imply new social interactions to balance conflicting objectives. Different stakeholders may have different perceptions of services, as exemplified by the case reported about pollination by Sagoff (2011) of apiarists and orange growers, the latter being alarmed by the risks of cross-pollination of oranges by bees. New contracts between social groups have to be established at the regional or local scale. For example, in Baden-Württemberg in Germany, the regional governmental or non-governmental organizations establish contracts with landowners that determine ways to manage fruit tree meadows in order to qualify for the right to market produce under a specific quality label that generates extra revenue (Thiel et al. 2012). Finally, the collective dimension of multi-service management in areas that include a high density of orchards is a new challenge that opens up new research avenues requiring the cooperation of the ecological and social sciences (Lescourret et al. 2015).

Acknowledgements

This study was funded by an industrial training agreement through a CIFRE research fellowship from the Ctifl (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) and the ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) on behalf of the French Ministry of Higher Education and Research.

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES



La démarche générale de la thèse a été décrite dans l'Introduction générale. Elle fait référence à deux modèles utilisés pour quantifier les indicateurs de fonctions et de services écosystémiques au sein d'un verger de pommier.

Ce chapitre a pour objectifs de :

1. présenter les indicateurs de fonctions et de services écosystémiques choisis dans le cadre de cette étude,
2. décrire globalement les deux modèles permettant de quantifier ces indicateurs,
3. présenter les dispositifs expérimentaux mobilisés et leurs intérêts pour ce travail,
4. décrire les mesures réalisées sur ces sites pour le paramétrage et l'évaluation des modèles.
- 5.

1. Choix des indicateurs de services écosystémiques et de fonctions écosystémiques

Le choix des indicateurs a été guidé par la nécessité qu'ils soient quantifiables et simulables par les modèles mobilisés afin de pouvoir analyser les liens entre fonctions et services, et d'identifier les synergies et/ou les conflits entre les services étudiés. Chaque service écosystémique peut être caractérisé par un ou plusieurs indicateurs. Ainsi pour les 6 services et nuisance écosystémiques analysés dans ce travail, 11 indicateurs ont été sélectionnés (Tab. 2.1).

1.1. Indicateurs de services écosystémiques

1.1.1 Disponibilité de l'azote dans le sol

Deux indicateurs sont utilisés pour évaluer la disponibilité de l'azote à court ou long terme. Sur le court terme, l'indicateur retenu est la concentration moyenne en nitrate du sol (mg N-NO₃/kg sol sec) calculée sur une année, dans l'horizon supérieur du sol (0 – 30 cm). Ceci représente le pool d'azote qui permet notamment de subvenir aux besoins de la plante. Cette concentration de N-NO₃ dans le sol peut-être très fluctuante en fonction du bilan journalier déterminé par l'offre du sol, la demande de la plante (absorption) et des microorganismes (réorganisation), et les sorties du système (pertes par lixiviation, dénitrification, etc.). La disponibilité de l'azote sur le long terme est évaluée grâce à la variation annuelle de la quantité d'azote organique dans l'horizon supérieur du sol (kg N/ha/an). Le maintien ou l'augmentation de ce stock, qui est une composante de la fertilité des sols, permet de préserver un potentiel pour subvenir aux besoins nutritionnels des plantes sur le long terme.

1.1.2 Régulation du climat

Il s'agit ici d'atténuation de l'émission de gaz à effets de serre. Deux indicateurs sont utilisés. Le premier concerne l'atténuation de l'émission de protoxyde d'azote (N_2O), un puissant gaz à effet de serre, en partie responsable de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et qui a un très fort pouvoir de réchauffement, équivalent à environ 300 fois celui de l'émission de CO_2 . L'indicateur retenu est la quantité d'azote dénitrifié sur l'année ($kg\ N- N_2O /ha /an$) qui est simulée par le modèle STICS (voir Section 2). Comme le service correspond à l'atténuation des émissions, on attribue un signe négatif à cette valeur. Le deuxième indicateur est l'atténuation de l'émission du CO_2 ($kg\ C/ha/an$), autre gaz à effet de serre. Il correspond aux quantités annuelles de carbone ($kg\ C/ha/an$) qui sont stockées dans les différents compartiments de l'arbre (fruits, feuilles, tiges) et sous forme organique « libre » ou « liée » (humus) dans le sol.

1.1.3 Cycle de l'eau et maintenance des flux hydriques

Trois indicateurs permettent d'approcher les services reliés au cycle de l'eau et à la maintenance de sa qualité. Il s'agit d'abord de l'humidité moyenne du sol sur l'horizon 0-30 cm ($g\ H_2O / kg\ de\ sol\ sec$ ou encore en % de sol sec). Cet indicateur permet de caractériser un état hydrique dans l'horizon du sol le plus exploité par les racines, où se déroule la majeure partie des processus biologiques. La quantité d'eau drainée (mm/an) est un indicateur des flux hydriques vers les couches profondes du sol (en dessous de la zone prospectée par les racines du pommier). Cet indicateur permet d'évaluer les possibilités de recharge des eaux profondes, ainsi que les risques potentiels de pollution par l'entraînement d'éléments vers les eaux profondes. Enfin, pour décrire la qualité de l'eau, nous utilisons un indicateur de prévention de lessivage des nitrates dans les eaux drainées ($mg\ N-NO_3/L$ d'eau drainée), qui est la concentration moyenne de nitrates dans les eaux drainées simulée par le modèle STICS à l'échelle d'une année, à laquelle on attribue un signe négatif (voir Section 1.3).

1.1.4 Production de fruits

Le rendement en fruits frais (t/ha) est utilisé pour caractériser la performance agronomique des vergers. Les modèles utilisés ne permettant pas de déterminer la distribution des fruits selon leur calibre, le critère de qualité pour la commercialisation de la production qui a été retenu est le poids frais moyen d'un fruit (g). Ce dernier est calculé (équation 1) à partir du rendement simulé par le modèle STICS et du nombre de fruits par arbre (charge en fruits) déterminé par les différents éclaircissements (chimique et/ou manuel) réalisés au cours du printemps:

$$Poids\ frais\ moyen\ d'un\ fruit\ (g) = \frac{rendement\ (t/ha)}{charge\ fruits * densité\ plantation\ (arbres/ha)} * 10^6 \quad [1]$$

1.1.5 Contrôle des bioagresseurs

Le service de contrôle des bioagresseurs n'a pas été quantifié directement dans ce travail du fait de l'absence d'indicateurs simples à mettre en œuvre pour permettre une évaluation assez globale du service. Pour contourner cette difficulté, nous avons considéré que l'estimation des dégâts occasionnés par les bioagresseurs au pommier (voir Section 1.2), combinée à une réduction d'usage des pesticides (voir Section 1.1.6), pouvait être le reflet du service de contrôle des bioagresseurs fourni par un agro-écosystème sous l'influence des pratiques culturales.

1.1.6 Prévention de nuisances environnementales dues aux pesticides

Nous avons pris en compte d'une manière très simple l'impact sur l'agroécosystème d'une gestion des bioagresseurs par les pesticides. Nous avons retenu l'indice de fréquence de traitement (IFT) pour le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure. C'est donc l'IFT utilisé, affecté d'un signe négatif.

Tableau 2.1: Indicateurs des services écosystémiques, leurs noms abrégés et leurs unités.

Service	Indicateur	Nom abrégé	Unité
Disponibilité de l'azote dans le sol	Variation annuelle d'azote organique	varNorg	kg N/ha/year
	Concentration moyenne de nitrates dans l'horizon 0-30 cm	meanNO3	mg N-NO ₃ /kg de sol sec
Régulation du climat	Prévention de la dénitrification de l'azote	N2Oprev	kg N-NO ₂ /ha/an
	Quantité de carbone fixée dans le sol et les organes annuels de l'arbre	Cseques	kg C/ha/an
Cycle de l'eau et maintenance des flux hydriques	Humidité pondérale moyenne de l'horizon 0-30 du sol	meanHum1	g H2O / kg de sol sec
	Quantité d'eau drainée	drainage	mm/an
	Prévention du lessivage des nitrates	waterNO3prev	mg NO ₃ /L d'eau drainée
Production de fruit	Rendement	yield	t/ha
	Poids frais moyen d'un fruit (critère	Fruitmass	g

	de qualité)		
Prévention des nuisances environnementales dues aux pesticides	Réduction de l'indice de fréquence de traitement (IFT) pour le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure	TFIreduc	Sans dimension

1.2 Indicateurs de fonctions écosystémiques

Pour caractériser les fonctions écosystémiques sous-jacentes aux services, nous avons mobilisé 11 indicateurs (Tab. 2.2).

Les fonctions liées au cycle de l'azote dans le sol comme la minéralisation et la lixiviation sont décrites par des indicateurs quantifiant l'azote minéralisé ou lessivé (kg N/ha/an). Dans l'arbre, nous utilisons l'absorption maximale en azote pendant la période de croissance de l'arbre (kg N/ha) ainsi qu'un indice de nutrition azotée allant de 0 à 1 (1 étant une situation de confort optimal pour l'arbre). L'humification correspond à la quantité de carbone séquestrée par an (kg C/ha/an) sous forme d'humus dans le sol. Dans l'arbre, nous avons seulement considéré la quantité de carbone accumulée dans les différents compartiments se développant au cours d'une année (fruits, feuilles, pousses de l'année). La quantité de carbone cumulée dans les fruits a été également décrite à la récolte pour caractériser l'allocation du carbone dans les fruits. Le statut hydrique de l'arbre peut avoir une grande importance pour la plupart des processus intervenant dans le fonctionnement de l'arbre et il peut être utilisé comme un indicateur du niveau de satisfaction de l'alimentation hydrique. L'indicateur utilisé est le potentiel hydrique stomatique, simulé par STICS, et exprimé sous forme d'indice variant entre 0 et 1, 1 étant une situation de confort maximal pour l'arbre. La perte de fruits liée aux attaques de carpocapse ou aux contaminations de tavelure est décrite par un pourcentage de fruits perdus à la récolte, avec un impact direct sur le rendement. L'attaque de pucerons provoque une perte de surface foliaire. Nous décrivons cette fonction par une fraction journalière de LAI en moins sur une période allant du pic de vol des pucerons (mi-mai) à la mise en place de la surface foliaire maximale de l'arbre (mi-juillet).

Tableau 2.2 : Indicateurs de fonctions écosystémiques, noms abrégés et unités.

Fonction	Indicateur	Nom abrégé	Unité
Minéralisation	Quantité d'azote minéralisé	N mineralized	kg N/ha/an
Lixiviation	Quantité d'azote lessivé dans les eaux drainées	N leached	kg N- NO ₃ /ha/an
Humification	Carbone séquestré dans la matière organique du sol	Cseques_soil	kg C/ha/an
Séquestration du	Carbone séquestré dans les organes	Cseques_tree	kg C/ha/an

carbone	annuels de l'arbre (fruits, feuilles, tiges)		
Statut hydrique de l'arbre	Potentiel hydrique stomatique	Watercomfort	sans dimension
Statut azoté de l'arbre	Index de nutrition azote	NNi	sans dimension
Absorption de l'azote	Quantité maximal d'azote absorbé au cours de l'année	Nabsorbed	kg N/ha
Allocation du carbone dans les fruits	Quantité de C dans le fruit à la récolte	Cfruit	kg C/ha
Perte de fruits due au carpocapse et à la tavelure	Pourcentage de perte de fruits à la récolte	fruitloss	sans dimension
Perte de surface foliaire due au puceron cendré	Fraction journalière de perte de surface foliaire	LAlloss_aphid	sans dimension

2 Description des deux modèles utilisés pour la simulation des indicateurs de services et de fonctions écosystémiques

Nous avons retenu deux modèles pour quantifier ces indicateurs : (i) STICS, un modèle de simulation journalière des interactions sol - plante - atmosphère sur un cycle de culture (Brisson et al. 2008), (ii) IPSIM (Aubertot and Robin 2013), un cadre de modélisation visant à reproduire virtuellement les effets des pratiques culturales et des conditions de milieux sur les communautés de bioagresseurs et leurs dégâts.

2.1 STICS

STICS est générique, c'est-à-dire qu'il est capable de simuler le développement et la croissance de différentes cultures (Launay et al. 2005). En cultures pérennes, STICS a été adapté à la vigne sur différents cépages (Garcia de Cortazar Atauri 2006) et est en cours d'adaptation sur *Miscanthus × Giganteus* (Strullu et al. 2014). Une partie du travail de thèse a été d'adapter STICS au pommier.

Le fonctionnement global de STICS est basé sur l'élaboration d'une surface foliaire qui intercepte la lumière, la convertit en biomasse et alloue le carbone dans 4 compartiments annuels des plantes : les fruits, les feuilles, les tiges annuelles et les racines de l'année. STICS décrit également les bilans hydriques et azotés entre la plante et le sol. Les entrées de STICS (Tab. 2.3) décrivent le climat, le sol et l'itinéraire technique de la culture. Pour chaque unité de simulation, les états initiaux du sol et de la plante sont décrits avec certaines données relatives à l'azote, au carbone ou à l'eau.

Tableau 2.3 : valeurs d'entrée nécessaires pour réaliser une simulation avec le modèle STICS	
Données climatiques journalières	Données sol
Latitude de la station	Teneur en CaCO ₃ du premier horizon (%)
Température minimale (°C)	Teneur en azote organique du premier horizon (%)
Température maximale (°C)	Albédo du sol sec
Pluviométrie (mm)	Teneur en argile de la couche de surface (%)
Rayonnement Global (MJ/m ² /jour)	Profondeur d'humification (cm)
Humidité de l'air (%)	Profondeur de chaque horizon (cm)
Vent (m/s)	Texture ou granulométrie de chaque horizon
	Densité apparente (g cm ⁻³)
	Teneur et type des cailloux dans chacun des horizons (%)
	Profondeur de l'obstacle racinaire (cm)
	Humidités caractéristiques (capacité au champ - HCCF (%) et au point de flétrissement – HMINF (%)) de chaque horizon
	Remontées capillaires (mm j ⁻¹)
	Humidité minimale pour activation des remontées capillaires (g eau g sol ⁻¹)
Données itinéraires techniques (plantes pérennes)	
Apports d'engrais minéral (type, quantité et jour d'apport)	
Apports d'engrais organique (type, quantité et jour d'apport)	
Irrigation (date, quantités et/ou seuils de stress hydrique à partir duquel l'irrigation est déclenchée)	
Densité de plantation (plantes/m ²)	
Effeuillage (jour et position)	
Jour de taille et traitement du bois de taille	
Eclaircissage (date et nombre de fruits à enlever)	
Données d'initialisation	
Teneur en eau de chacun des horizons au début de la simulation (%)	
Teneur en azote de chacun des horizons au début de la simulation (%)	
Quantité des réserves carbonées dans la plante au début de la simulation (t/ha)	
Quantité des réserves azotées dans la plante au début de la simulation (kg/ha)	
Densité racinaire dans chacun des horizons (cm/cm ³)	
Stade initial du développement de la plante	

Les variables de sortie de STICS quantifient une très large gamme de processus liés aux cycles de l'azote, du carbone et de l'eau, notamment en ce qui concerne le développement et la croissance de la plante, les transformations dans le sol et les émissions de gaz dans l'atmosphère. Dans STICS, il est possible de choisir entre différents formalismes pour décrire certains processus écophysologiques, afin de représenter au mieux le fonctionnement d'une espèce. Par exemple, pour le mode d'interception de la lumière, nous avons utilisé une approche de transfert radiatif de la lumière plutôt que la loi de Beer, à cause du peuplement en rangs des vergers. Les paramètres décrivant les principaux processus physiologiques de la plante sont regroupés dans un fichier unique pour chaque variété.

Pour paramétrer le modèle STICS dans le cas du pommier, nous nous sommes appuyés sur la démarche décrite par Launay et al. (2005) qui propose de combiner différentes sources d'informations et/ou méthodes pour déterminer les paramètres du modèle :

- des valeurs bibliographiques : c'est le cas notamment des valeurs des températures de développement du pommier (Lakso, 1985) ou de paramètres de croissance des racines (Li Ma et al. 2013)
- des valeurs connues pour d'autres plantes, en particulier la vigne, dont la physiologie est, parmi les plantes paramétrées dans STICS, la plus proche du pommier.
- des valeurs estimées grâce à des mesures expérimentales via des courbes paramétrées (voir Section 4 pour les mesures) ou par confrontation des sorties du modèle avec les valeurs observées.

Le paramétrage du modèle STICS est détaillé dans le chapitre 3 et les valeurs des paramètres sont données en annexes de ce même chapitre.

2.2 IPSIM

Le modèle STICS ne prenant pas en compte les éléments biotiques de l'agroécosystème, nous avons quantifié grâce à la plate-forme générique de modélisation - IPSIM - la sévérité des dégâts causés par 3 principaux bioagresseurs du pommier dans la région sud-est de la France: le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*) , le carpocapse (*Cydia pomonella*) et la tavelure (*Venturia inaequalis*). IPSIM permet d'évaluer les dégâts de bioagresseurs sur une culture en fonction des pratiques culturales, et d'éléments biotiques et abiotiques de l'environnement. Le modèle est basé sur une hiérarchisation qualitative de ces facteurs et structuré par un arbre de décisions permettant *in fine* de fournir un profil de dégâts pour chaque système de culture considéré.

DEXI est la structure informatique sur laquelle repose IPSIM; elle permet d'adapter le modèle à tout type de culture (Robin et al. 2013). Les facteurs en jeu pour la prédiction des profils des dégâts et leur hiérarchisation sont renseignés par (i) des références scientifiques et (ii) la consultation d'experts.

La structure et le paramétrage du modèle 'IPSIM-Pommier', qui ont été réalisés avec l'appui d'un stage de Master 2 en 2015, sont détaillés dans le chapitre 4.

3 Les dispositifs expérimentaux et les systèmes de culture étudiés

Nous avons choisi de travailler sur deux dispositifs expérimentaux présentant d'une part des conditions pédoclimatiques différentes dues à leur localisation géographique et d'autre part une diversité de combinaisons de techniques mises en œuvre dans le cadre d'expérimentations de systèmes de culture (Fig. 2.1). Cette diversité est mise à profit pour estimer certains paramètres des modèles STICS et IPSIM, mais aussi pour analyser les liens entre services écosystémiques dans des systèmes de vergers bien différenciés. Sur chaque dispositif, nous avons travaillé sur 3 systèmes de culture différents définis par les grandes orientations stratégiques suivantes : i) un système de référence (conventionnel) conduit selon les pratiques régionales, ii) un système économe en produits phytopharmaceutiques (objectif de réduction de 50% des IFT) et iii) selon le site, un système très bas intrants ou un système conduit en agriculture biologique. Les performances globales (rendement, IFT, etc...) de ces systèmes sont présentées dans l'Annexe 2.A.

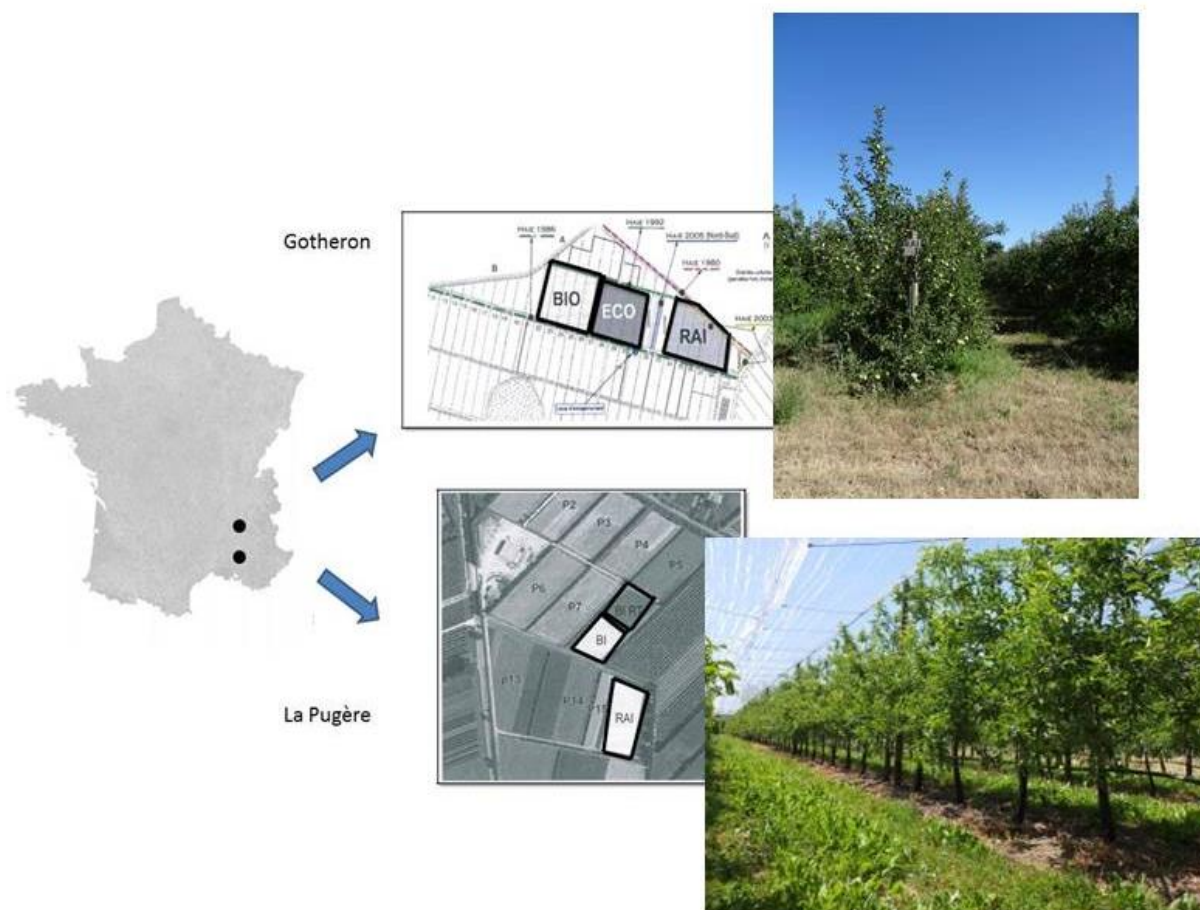


Figure 2.1: Localisation des deux sites expérimentaux de Gotheron et la Pugère

3.1 Description de l'essai système « bas intrants » du site expérimental La Pugère

3.1.1 Contexte agronomique et expérimental

La station expérimentale arboricole « La Pugère » est localisée sur la commune de Mallemort (13) dans la vallée de la Durance, au cœur du principal bassin de production de pommes et de poires en France. Le dispositif essai système « bas intrants » en vergers de pommiers a été implanté en mars 2010. Les systèmes ont été conçus et sont expérimentés avec comme objectifs de réduire, voire supprimer, les produits phytopharmaceutiques (suppression des herbicides, réduction d'au moins 50% des fongicides et des insecticides de synthèse) et d'économiser les intrants comme l'eau d'irrigation et les engrais azotés, tout en limitant l'utilisation des énergies fossiles par la restriction de passages d'engins agricoles. Le dispositif est constitué de 3 systèmes dont deux sont cultivés avec la variété Golden : (i) un système « raisonné » faisant référence à la conduite classique de la région, (ii) un système « bas-intrants », (iii) un système « bas-intrants » avec une variété résistante à la tavelure (variété Crimson Cripps® ; Fig. 2.2).



Figure 2.2: Système bas-intrants avec variété résistante à la tavelure (Pu_LISR2014) de la station expérimentale 'La Pugère'.

Les systèmes se différencient par certains choix de plantation (densité de plantation, porte-greffe et variété), de conduite des arbres (forme libre vs conduite en solaxe) et de méthodes pour contrôler les bioagresseurs : filet Alt'Carpo pour les systèmes « bas-intrants », variété résistante à la tavelure pour un des trois systèmes, diminution des apports en eau pour les systèmes « bas-intrants », etc. (Tab. 2.4 et 2.5).

Tableau 2.4 : Eléments structurels, règles de décision et itinéraire technique de la campagne 2014 du dispositif de la station expérimentale La Pugère			
Systèmes	bas-intrant	bas-intrant résistant à la tavelure (RT)	système de référence « raisonné » (Pu_CON2014)
Abbréviations systèmes	Pu_LI2014	Pu_LISR2014	Pu_CON2014
Gestion du carpocapse	filet Alt'Carpo gestion des fonds de cueilles	filet Alt'Carpo gestion des fonds de cueilles	Chlorantraniliprole le 12/05 Emamectine le 08/07 et le 01/08 gestion des fonds de cueilles

Gestion du puceron cendré	Avant floraison : Tau-fluvalinate le 20/03 + huile + acétamipride le 02/04 (curatif) Après floraison : Acetamiprid (curatif) le 22/04 favorisation de la présence des auxiliaires (haie composite, bandes florales, abri artificiel)	Avant floraison : Tau-fluvalinate le 20/03 + huile + acétamipride le 02/04 favorisation de la présence des auxiliaires (haie composite, bandes florales, abri artificiel)	Avant floraison : Tau-fluvalinate le 20/03 + huile + acétamipride le 02/04 (curatif) Après floraison : Acetamiprid (curatif) le 22/04
Gestion de la tavelure	Prophylaxie sur feuille (perlurée) Préventif : produits de contact : soufre, oxychlorure de cuivre + thirame ou captane, dithianon ou mancozèbe Rattrapage : Thirame ou captane + pyriméthanol, dithianon, dodine, ou diféconazole en fonction de l'humidité du feuillage et de la température + durée d'humectation	Variété résistante + lutte préventive avant les épisodes contaminants majeurs, au cours d'une période de risque grave (selon les Courbes de Mills) et dans le cadre d'un stock élevé (11 à 90 %) d'ascospores mûres et projetables	Préventif : produits de contact --> thirame ou captane, dithianon ou mancozèbe Rattrapage : Thirame, captane, dithianon ou mancozèbe en fonction de l'humidité du feuillage et de la température + durée d'humectation
Utilisation des intrants phytosanitaires	Efficience des intrants phytosanitaires par réduction des volumes appliqués selon principe de TRV (tree row volume) et des doses de substance active		Dose homologuée
fertilisation	minérale	pas de fertilisation	minérale
irrigation	suivi sondes capacitatives - confort hydrique restreint pour les horizons 0-30 et 30-60	suivi sondes capacitatives - confort hydrique restreint pour les horizons 0-30 et 30-60	suivi sondes capacitatives – grand confort hydrique pour les horizons 0-30 et 30-60
Entretien du sol	Bande florale + bande enherbée de 100 % de ray-grass + trèfle blanc sur passage des roues	Bande florale + bande enherbée de 100 % de ray-grass + trèfle blanc sur passage des roues	Enherbement spontané, majorité de graminées
variété	Golden Delicious 972	Crimson Crisp	Golden Delicious 972
nombre d'arbres par ha	800	800	2000
densité de plantation	5m x 2.5m	5m x 2.5m	4m x 1.25m
porte-greffe	M7	M7	Pajam® 2 Cepiland
Forme fruitière	forme libre	forme libre	solaxe

Tableau 2-5 : Eléments structurels, règles de décision et itinéraire technique de la campagne 2015 du dispositif de la station expérimentale La Pugère

Système	bas-intrants	bas-intrant résistant à la tavelure (RT)	système conventionnel
Abbréviation Systèmes	Pu_LI2015	Pu_LISR2015	Pu_CON2015
Gestion du carpocapse	filet Alt'Carpo gestion des fonds de cueilles Granulose le 10/06 et le 16/06	filet Alt'Carpo gestion des fonds de cueilles Granulose le 10/06 et le 16/06	Chlorantraniliprole le 30/05 Granulose 10/06 et le 16/06 Emamectine le 10/07 gestion des fonds de cueilles
Gestion du puceron cendré	<i>Avant floraison</i> : acétamipride le 15/04 favorisation de la présence des auxiliaires (haie composite, bandes florales, abri artificiel)	<i>Avant floraison</i> : acétamipride le 15/04 favorisation de la présence des auxiliaires (haie composite, bandes florales, abri artificiel)	<i>Avant floraison</i> : acétamipride le 15/04 Après floraison : Flonicamid le 24/04
Gestion de la tavelure	Prophylaxie sur feuille (perlurée) Rattrapage : difénoconazole	Variété résistante + lutte préventive avant les épisodes contaminants majeurs, au cours d'une période de risque grave (selon les Courbes de Mills) et dans le cadre d'un stock élevé (11 à 90 %) d'ascospores mûres et projetables	<i>Préventif</i> : produits de contact --> dodine <i>Rattrapage</i> : Captane ou difénoconazole en fonction de l'humidité du feuillage et de la température + durée d'humectation
Utilisation des intrants phytosanitaires	Efficience des intrants phytosanitaires par réduction des volumes appliqués selon principe de TRV (tree row volume) et des doses de substance active		Dose homologuée
Fertilisation	Pas de fertilisation	Pas de fertilisation	Pas de fertilisation
Irrigation	suivi sondes capacitatives - confort hydrique restreint pour les horizons 0-30 et 30-60	suivi sondes capacitatives - confort hydrique restreint pour les horizons 0-30 et 30-60	suivi sondes capacitatives – grand confort hydrique pour les horizons 0-30 et 30-60
Entretien du sol	Enherbement spontané, majorité de graminées		
Variété	Golden Delicious 972	Crimson Crisp	Golden Delicious 972
nombre d'arbres par ha	800	800	2000
distances de plantation	5m x 2.5m	5m x 2.5m	4m x 1.25m
porte-greffe	M7	M7	Pajam® 2 Cepiland
Forme fruitière	forme libre	forme libre	solaxe

3.1.2 Contexte pédologique

Le sol est constitué de limons argilo-sableux avec 20% d'argile et est sans caillou. Il est issu des alluvions calcaires de la Durance et contient 40 % de calcaire total (CaCO_3). Le pH est d'environ 8.5. La densité apparente des horizons supérieurs est de 1.3 et de 1.45 dans l'horizon 60 – 100 cm. L'humidité à la capacité au champ est de 25 % et la réserve utile en eau est estimée à 169 mm sur une profondeur de 1 mètre. Les teneurs en carbone organique et en azote organique sont de 13.3 g C/kg de sol et de 1.4 g N/kg de sol sec, respectivement. Le rapport C/N initial est de 9.5.

3.1.3 Contexte climatique

Le climat est de type méditerranéen avec des hivers doux et des étés chauds et secs. Il se caractérise aussi par la présence du mistral - vent sec et frais provenant du Nord. La station météorologique la plus proche du site expérimental 'La Pugère' est située à Salon-en-Provence (base de données Climatik de l'Inra, Tab. 2.3). Nous avons comparé les données météo des années 2014 et 2015 aux valeurs moyennes depuis 2004. La pluviométrie annuelle est en moyenne de 700 mm, plus particulièrement 813 mm en 2014 et 633 mm en 2015. L'année 2014 présente une humidité de l'air plus élevée que la moyenne, notamment en été et en hiver. Le rayonnement global a été légèrement plus faible que la moyenne en été, avec des températures moyennes plus faibles en été mais plus élevées à partir du mois d'octobre. Les précipitations ont été bien plus élevées que la moyenne durant l'automne et l'hiver dû aux épisodes cévenols. En revanche, l'année 2015 est marquée par une forte sécheresse, de fortes chaleurs durant les mois estivaux et une irrégularité des pluies, notamment pendant le mois d'octobre toujours dû aux épisodes cévenols. Ainsi, les différences de climat entre les années 2014 et 2015 apportent une source de variabilité supplémentaire.

3.2 Description du dispositif 'Bioreco' de l'INRA de Gotheron

3.2.1 Contexte agronomique et expérimental

Le dispositif BioREco est implanté sur le domaine expérimental de l'INRA de Gotheron, à Saint-Marcel-lès-Valence, dans la Drôme (26).

Ce dispositif a été implanté en 2005 et a permis d'expérimenter des systèmes durant la période juvénile des vergers (2005 à 2009) puis sur la période de pleine production (2010 à 2016). Les systèmes de culture expérimentés se distinguent par la variété cultivée (3 variétés ; Golden Smoothee, Ariane et Melrose) croisée avec 3 différentes stratégies de protection du verger (Simon et al. 2015) : (i) un système conventionnel faisant référence à la conduite classique de la région, (ii) un système bas-intrants, notamment en ce qui concerne la protection phytosanitaire et (iii) un

système conduit en agriculture biologique, présentant notamment des différences avec les deux autres en matières de fertilisation (organique uniquement) et de protection phytosanitaire (huile et argile pour puceron cendré, virus de la granulose pour la carpocapse, fongicides de contact pour la tavelure). Parmi ces 9 systèmes de culture, nous avons étudié les 3 systèmes de culture cultivés avec la variété Golden Smoothie pour être homogène avec le site de La Pugère. Les principales caractéristiques des éléments structurels et des itinéraires techniques mis en œuvre en 2015 sont présentés dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Eléments structurels, règles de décision et itinéraire technique de la campagne 2015 du dispositif BIOREco de l'INRA de Gotheron			
Systèmes	agriculture biologique	bas intrants	système conventionnel
Abbréviations Systèmes	Got_ORG2015	Got_LI2015	Got_CON2015
Gestion du carpocapse	Seuil = 0.3% dégâts Granulose le 04/08, 12/08, 04/09 + confusion à compter du 1 ^{er} avril + gestion des fonds de cueilles	Granulose le 12/08 + confusion + gestion des fonds de cueilles	Granulose le 16/06, 04/08, 12/08, 28/08 Emamectine le 23/07 + confusion
Gestion des pucerons	Avant floraison : huile (mars) Après floraison : argile 06/05 et 22/09	Avant floraison : huile (mars) + Acetamiprid 09/04 Après floraison : Flonicamid le 19/05 + argile le 22/09	Avant floraison : Pyrimicarbe le 31/03, Acetamiprid le 09/04 Après floraison : Flonicamid le 19/05
Gestion de la tavelure	Seuil : 2% feuilles tavelées cuivre faible dose (pré-floraison) enfouissement des feuilles sur le rang, balayage des feuilles soufre (post-floraison)	Seuil : 1% de pousses tavelées Préventif avant pluie et curatif/stop en encadrement enfouissement des feuilles sur le rang, balayage des feuilles soufre (post-floraison)	Seuil : 1% de pousses tavelées Préventif avant pluie et curatif/stop en encadrement (diathionon) Andainage, broyage feuilles inter-rang
fertilisation	Organique : apport de compost en hiver, puis 20 à 30 u N + K en début de printemps, puis compost commercial type vegethumus mi-juin Total : 85 u N (supposé biodisponible)	Organo-minérale : apport de compost en hiver, puis 2 apports d'azote minéral 20 à 25 u N Total : 90 u N	Minérale : 30 u N au débourrement, 30 u N en mai et 10 à 20 u N en post-récolte Total : 90 u N
irrigation	Méthode bilan hydrique / ETP. Contrôle par tensiomètre – quantité de 10 mm (3h) à 13 mm (4h) par irrigation. Confort hydrique mais restriction à la parcelle		

	possible selon vigueur de l'arbre.		
Entretien du sol (inter-rang)	Mélange de graminées, passage de ou broyage herbe. 1.6 m de bande non-enherbé sur le rang		
Entretien du sol (rang)	Zéro herbicides / buttage-débutage avec Ommas	buttage- débutage avec Ommas + rattrapage herbicide	Herbicides systémiques
Variété	Golden smoothee		
Distances de plantation	2m x 5m		
nombre d'arbres par ha	1000		
porte-greffe	PI80		
Forme fructière	Solaxe		

3.2.2 Contexte pédologique

Le sol est formé sur des terrasses anciennes du Rhône type *Diluvium alpin*. Il est peu profond, lessivé et très caillouteux (30% à 50% de cailloux constitués de graviers morainique - donc poreux - qui permettent de restituée l'eau infiltrée). La terre fine est constituée de limons sableux avec 16% d'argile, une très faible teneur en calcaire et présente un pH moyen de 7. La densité apparente du sol est de 1.3 sur les premiers horizons (0 à 30 cm puis 30 à 50 cm) et de 1.45 pour l'horizon 50 – 100 cm. L'humidité à la capacité au champ est de 16% et la réserve utile en eau est estimée à 104 mm sur 1 m de profondeur. Le rapport C/N initial est d'environ 10. Du fait des cailloux, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (entre 28 et 45 mm/jour selon l'horizon) est plus rapide qu'à la Pugère. De plus, le sous-sol est riche en argile (Fig. 2.3) et induit des remontées capillaires en été.



Figure 2.3 : Profil de sol à Gotheron sur le rang et l'interrang du système conventionnel à Gotheron (Got_CON2015).

3.2.3 Contexte climatique

Le climat est semi-continentale avec des influences méditerranéennes estivales. La pluviométrie annuelle de l'année 2015 a été de 878 mm. L'année 2015 a été particulièrement sèche au mois de juillet par rapport à la moyenne depuis 2004, avec un ensoleillement plus fort et des températures plus élevées que la moyenne pendant l'été et un peu moins de vent durant toute l'année. L'Annexe 2.G présente des données climatiques permettant de comparer les deux sites et l'année 2014-2015 sur le site de La Pugère.

4 Mesures expérimentales

Une base de données a été créée qui concerne les deux dispositifs expérimentaux, afin de réunir les 3 types de données présentées ci-dessous. Certaines de ces données sont présentées en annexes.

4.1 Données correspondant aux variables d'entrées des modèles

Elles sont nécessaires à la caractérisation du sol, du climat, de la pression des bioagresseurs, de l'itinéraire technique et de l'initialisation de la simulation (Tab. 2.3). Certaines données étaient déjà disponibles auprès des stations, il s'agit notamment d'éléments caractérisant le sol et les bioagresseurs, ainsi que l'itinéraire technique précis du verger (types, quantités et dates d'apport d'intrants (Annexe 2.B) ou de passage de machines). Des profils de sol réalisés en 2009 sur les 2 sites ont permis de définir les différents horizons et de caractériser qualitativement leur état structural et la composition des cailloux à Gotheron (Annexe 2.C).

4.2 Données correspondant aux variables permettant de paramétrer et d'évaluer le modèle

Le deuxième type de données représente les variables qui caractérisent les arbres aux différents stades de développement, et les dégâts des bioagresseurs au cours de l'année. Ces variables permettent de paramétrer les modèles, et dans un second temps, les évaluer. Pour le modèle STICS, nous nous sommes focalisés sur 4 variables : (i) la biomasse des feuilles et des tiges, (ii) la biomasse des fruits, (iii) la dynamique de l'indice foliaire (LAI), (iv) la teneur en azote des organes annuels. Pour cela nous avons procédé à un ensemble de mesures qui seront détaillées dans le chapitre 3. Pour le modèle IPSIM, le jeu de données a été constitué de notations de dégâts des bioagresseurs au cours de l'année et à la récolte (Annexes 2.D, E et F + Chapitre 4).

4.3 Données supplémentaires

Le troisième type de données permet d'apporter des informations supplémentaires sur le fonctionnement du verger. Il s'agit en particulier des données qui ne sont pas simulées par les modèles. Nous avons notamment déterminé la teneur en carbone et en azote de tous les organes aériens de l'arbre : feuilles, fruits, tige, bois de branches fruitières, bois du tronc, ainsi que la biomasse accumulée par an dans le bois structural aérien de l'arbre – c'est-à-dire des branches fruitières et du tronc. Pour le bois structural accumulé par an, nous avons déterminé le volume du tronc à partir des diamètres du haut et du bas de l'arbre. La densité de bois de pommier utilisée a été fixée à 750 kg/m³ (Zhang 1993). Pour les branches fruitières, nous retrouvons le poids sec de chaque branche fruitière grâce à une relation d'allométrie reliant le diamètre et le poids sec d'une branche fruitière. La différence de diamètre d'une branche fruitière d'une année sur l'autre permet de calculer un cumul de masse sèche annuel sur les branches fruitières, auquel on ôte le poids des branches fruitières taillées. Nous avons également mesuré la masse sèche totale ainsi que la teneur en azote et en carbone dans les branches fruitières, le tronc et une partie des racines (incluant collet

et racines principales) sur 3 arbres arrachés sur chaque système du dispositif de Gotheron. Ces valeurs permettent de comparer les valeurs de carbone séquestré dans les arbres de Gotheron et La Pugère (comprenant d'une part les quantités de carbone sequestré dans les organes annuels simulées par STICS et d'autres part les quantités de carbone séquestré dans les parties structurales) à ceux de la littérature.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES EN VERGER DE POMMIERS A L'AIDE DU MODELE STICS

ANALYZING ECOSYSTEM SERVICES IN APPLE ORCHARDS USING THE STICS MODEL³

Abstract

Fruit tree production faces a major challenge: ensure maximum productivity with due consideration for the environmental and human health. The increasingly recognized concept of ecosystem service has highlighted the value of non-marketed services provided by agroecosystems. However, few studies have focused on multiple ecosystem service assessment in fruit tree ecosystems. In this paper, we investigate how agricultural management and pedoclimatic conditions affect the joint production of marketed and non-marketed ecosystem services in the case of apple orchards. Our study was based on the cascade model of Haines-Young & Potschin (2009), which linked the agroecosystem's biophysical structures, its ecosystem functions and the services drawn from these functions. Four ecosystem services were considered: soil nitrogen availability, climate regulation, water regulation and fruit production. Ecosystem functions and services were described by specific indicators that were quantified using the STICS soil crop model. This model was parameterized on apple orchards using data collected on two experimental apple orchard sites under conventional and low-input management in the south-east of France. Correlations between ecosystem functions and ecosystem services simulated by STICS were therefore investigated considering the impacts of both agricultural practices and pedoclimatic conditions. We found 15 significant interactions between ecosystem services, 8 being positive and 7 being negative. N denitrification and leaching prevention appeared to be in conflict with soil mean nitrate concentration and mean soil humidity, while soil nitrogen availability and C sequestration presented a strong synergy. Ecosystem services profiles of the studied cropping systems were analyzed in terms of agricultural management and pedoclimatic conditions variability. Nitrogen fertilization management and planting density were particularly important for the delivery of multiple ecosystem services. However, soil and climate effects were far from negligible, especially for nitrogen and water related services. Models enable to quantify and analyze profiles of ecosystem services, and they should be helpful in instrumenting the dialogue between fruit growers and other stakeholders.

Keywords: apple orchard, multiple ecosystem services, cropping system, pedoclimatic conditions, model, STICS

³Ce chapitre va être soumis à European Journal of Agronomy

1. Introduction

The highly expanding ecosystem services concept, popularized by the Millennium Ecosystem Assessment in the early 2000s (Reid et al. 2005), has emphasized the importance of non-marketed performances of ecosystems. In agriculture, this concept could help study the duality of providing acceptable food production levels and preserving natural resources - such as soil and water - and ecosystem functions - such as mineralization, pest predation or pollination (Zhang et al. 2007; Swinton et al. 2007; Power 2010). The cascade model of Haines-Young & Potschin (2009) places ecosystem services in the middle of a 'production chain' linking the agroecosystem's biophysical structures, its functions, the services drawn from these functions and the benefits drawn from these services. Orchards are agroecosystems, and as such, they deliver not only the fruit production service but also several other non-marketed ecosystem services. The perennial nature of orchards strongly impacts the nitrogen, water and carbon biogeochemical cycles within the plant and soil compartments. Such specificity makes orchards interesting for ecosystem services analysis. Orchard ecosystem functions interact dynamically and respond differently depending on pedoclimatic factors and agricultural practices. This results in complex positive or negative relationships between ecosystem services. Quantifying these interdependences may be really challenging.

Using crop models offers the possibility to formalize the functions of agroecosystems, their reciprocal links, their response to agricultural practices and pedoclimatic conditions and the services drawn from them. This makes crop models interesting tools for investigating relationships between multiple ecosystem services. Crop models such as APSIM (Keating et al. 2003), CropSyst (Stockle et al. 2003), DSSAT (Jones et al. 2003) or STICS (Brisson et al. 1998b) have been used to simulate specific functions in the agroecosystem. But few studies have used crop models for multiple ecosystem services analysis. The only exception is Kragt and Robertson (2014) who investigated, using the APSIM model, the links between agricultural practices such as crop residues management or the use of perennial pastures and the joint production of agricultural commodities and other ecosystem services including soil carbon, nitrogen supply and water regulation.

In this paper, we investigate how agricultural management and pedoclimatic conditions affect the joint production of ecosystem services in apple orchards using the STICS crop-soil model. We considered four interrelated ecosystem services taken from the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) categorization (Haines-Young and Potschin 2013) which are all impacted by agricultural practices, soil and climate. The first one is nitrogen soil availability on the short and long term, which describes an important aspect of soil fertility. The ecosystem functions supporting this service are impacted in particular by the type of fertilization (organic or mineral) as well as by soil

characteristics. The second service is climate regulation that relies on greenhouse gas emission mitigation through carbon sequestration or denitrification prevention. The third service is water cycle regulation with consideration of water flow maintenance within the soil-plant-atmosphere system and of water quality in terms of nitrate concentration in drained water. It may be modified by management features such as the applied quantity of mineral fertilizers and by the pedoclimatic conditions (heavy rainfalls, high infiltration rates in soil). The fourth service is fruit production, described by fruit quantity and quality. In order to achieve this complex analysis we adapted the STICS crop model using data collected in conventional and low-input apple orchards during two years in the south-east of France. Ecosystem service and ecosystem function indicators were predicted by the model on the cropping systems used for model parameterization as well as an organic system and a low-input with a scab resistant cultivar system. These indicators enabled to analyze ecosystem service profiles through upstream functions, and to account for the impact of agricultural practices and pedoclimatic conditions on those ecosystem services.

2. Model presentation

2.1 General outline

The conceptual scheme of Figure 3.1 connects the ecosystem services, ecosystem functions and agricultural practices under study to the STICS processes and inputs. STICS (Simulateur multiDisciplinaire pour les Cultures Standards) (Brisson et al. 1998b; Brisson et al. 2009), is a soil-plant simulation model developed at INRA since 1996. It uses a daily time scale over one crop cycle or several successive cycles. Its space scale is unidimensional. In the STICS model, the soil is described by a sequence of horizontal layers, each distinguished by humidity and mineral or organic nitrogen content, as well as other soil characteristics such as texture. Inputs describe climate, soil and crop management, including the different agricultural practices highlighted in Figure 3.1. They impact all the studied ecosystem functions and consequently the ecosystem services, which correspond to the outputs of the model. The model describes crop development, including root growth, and changes in soil characteristics. It also describes the flow and distribution of water and nitrogen among the different soil and plant compartments and assesses these flow balances. The global functioning of the STICS model is based on the development of a foliar surface that intercepts light, converts it into biomass and allocates carbon to roots and three aboveground annual organs: fruits, leaves and annual stems, as well as to roots. Indices of nitrogen and water comfort are calculated in water and nitrogen balance modules. Low values of those indices reduce leaf growth and biomass accumulation. Finally, STICS describes interactions between crop management and the soil-plant-

atmosphere continuum as well as the combined effects of climate and water balance on the canopy's microclimate.

A simulation unit in STICS combines (i) a given pedoclimatic situation described by soil characteristics (texture, structure, water holding capacity) on different soil layers and annual climate characteristics (solar radiation, temperature, potential evapotranspiration); (ii) physiological crop-specific (and cultivar-specific) parameters; and (iii) the agricultural management (training system, tillage, harvest decision). Nitrogen and water amounts in soil, aboveground and belowground biomass are initialized at the first date of the simulation. The model runs through the simulation period based on the concept of growing degree days (Bonhomme 2000). Phenological stages are used as steps for simulating vegetative dynamics and harvested organs (i.e. fruit) growth independently. The simulation duration was fixed to one year in our case.

2.2 The studied agricultural practices

The work was conducted on three different cropping systems: one is considered as conventional with reference to those of southeastern France; a second system is considered as low input, aiming at reducing pesticides but also mineral fertilizers; and a third one is an organic cropping system, with no use of synthetic products. Cropping systems varied in planting density, irrigation and fertilization management (Fig. 3.1). Planting density typically impacts radiation interception, thus leaf growth, mostly through interplant competition. Irrigation impacts water and nitrogen transfers in soil and water and nitrogen transfers between plant and soil, and therefore fruit production. Fertilization impacts the level of nitrogen stress of the tree, thus tree biomass and consequently yield, as well as soil functions such as nitrogen leaching, denitrification or immobilization that influence soil mineral nitrogen availability. Nitrogen fertilization can be mineral and/or organic in apple orchards and the STICS model allows considering the type of fertilizer input (i.e. ammonium nitrate for mineral inputs or organic amendments). Pruning and thinning (Fig. 3.1) drive the crop load, an ecosystem function indicator used in the study (see Section 3.5). However, since the weight of those practices is far lower than the drastic effect of alternate bearing on crop load in the studied orchards (see Section 3.1.1), they were not considered explicitly in the model. In order to simplify the analysis of the results and manage as better as possible the ecosystem services and ecosystem functions, we did not consider potential nitrogen and water competition between the crop and the grass ground cover in the orchard's alley. We made the hypothesis that there is little interaction between within-row trees (representing one third to half of the surface area of the orchard) and the grass ground cover in the alley. The potential organic matter delivered from the grass ground cover was not taken into account either.

3. Materials and methods

3.1 Experimental data

3.1.1 Experimental sites

We parameterized and evaluated the model on field data collected on two experimental sites differing in pedoclimatic conditions, each of which comprised three cropping systems (Tab. 3.1).

The first site, La Pugère, is located in the area of Durance valley (southeastern France, 43°43'N, 5°10'E). Field capacity in Pugère was at 25% of soil dry mass with a water holding capacity of 169 mm. The three cropping systems were (i) a local conventional system, CON; (ii) a low input system, LI (both of them were planted with Golden Delicious 972 cultivar); and (iii) a low input with scab

resistant cultivar system, LISR (planted with Crimson Crips® cultivar) (Tab. 3.1 and Appendix 3.A). All systems were irrigated with micro-aspersion following tree water demand. On this site, alternate bearing was observed with an “on-crop” year in 2014 producing approximately 300 fruits per tree and an off-crop year in 2015 producing approximately 100 fruits.

The other site was located at the INRA unit of Gotheron (southeastern France, 44°58’N, 4°55’E) on a soil formed on old Rhône river’s terraces of ‘Diluvium alpin type. On this site, data were only collected in 2015. Field capacity was at 16% of soil dry mass with a water holding capacity of 104 mm. Apple orchards were planted in 2005 with Golden Delicious Smoothee® CG10YD cultivar and were managed under (i) a local conventional system, CON, (ii) a low-input system, LI and (iii) an organic system, ORG (Tab. 3.1 and Appendix 3.A).

Table 3.1: Main characteristics of the 9 cropping systems used to parameterize and evaluate the STICS model for apple orchards. CON represents conventional cropping systems, LI low input cropping systems, LISR low input cropping systems planted with a scab resistant cultivar and ORG organic cropping systems.

Cropping system	Location	Soil	Year	Annual rainfall (mm)	Tree age	Cultivar	Rootstock	Plant density (plant/ha)	Crop load (number of fruits /tree)
Pu_CON2014	Pugère	Heavy with clay loam texture, coming from Durance's limestone and alluvium	2014	813	4	Golden Delicious 972 A	Pajam 2 cepiland	2000	150
Pu_LI2014						Crimson Crisp®	M7	800	350
Pu_LISR2014							M7	800	259
Pu_CON2015	Pugère	Heavy with clay loam texture, coming from Durance's limestone and alluvium	2015	633	5	Golden Delicious 972 A	Pajam 2 cepiland	2000	60
Pu_LI2015						Crimson Crisp®	M7	800	80
Pu_LISR2015							M7	800	121
Got_CON2015	Gotheron	Shallow, pebbly and leached, with poor water and nitrogen content	2015	830	10	Golden Delicious type (Smoothee®)	PI80	1000	360
Got_LI2015							Supporter®		340
Got_ORG2015							4		195

3.1.2 Field data collection

In order to estimate parameters of the STICS model describing apple growth, three net primary production components were measured separately: leaves, annual stems and fruits. For each component, the total annual biomass and nitrogen content were measured. For leaves, Leaf Area Index (LAI) dynamics was estimated as well. In addition, measurements of wood production were made at the end of the growing season.

Growth and nitrogen content of leaves. After bud burst, when leaves had reached their final shape, the number of leaves and stem length were measured on five long shoots of 10 trees per cropping system, every 10 to 15 days until defoliation. At the same time, 20 leaves from long shoots and 20 leaves from short shoots were randomly selected in each orchard to measure foliar surface, fresh and dry mass, as well as nitrogen content. Long shoot and short shoot proportions were measured in 2015. The total foliar surface area of a tree at any time t in the growing season, FS_{tree} , was estimated as follows:

$$FS_{tree(t)} = N_{vegpts} * [SS * FS_{SS}(t) + LS * FS_{LS}(t)] \quad (1)$$

where N_{vegpts} is the number of vegetative points (i.e. the total number of shoots), SS the proportion of short shoots, LS the proportion of long shoots, and $FS_{SS}(t)$ and $FS_{LS}(t)$ the mean foliar surface area at time t of a short shoot and of a long shoot, respectively. N_{vegpts} was considered constant. After fruit harvest, at the beginning of October, we operated a defoliation of three trees per cropping system to estimate the total foliar surface area of a tree and calculated N_{vegpts} on this basis (equation 2); as leaf fall occurred from mid-July (when foliar surface was at maximum) to the day of defoliation, a correction coefficient of the number of leaves per shoot was used:

$$N_{vegpts} = [FS_{tree\ defol} / Coef_{corr}] / [FS_{SS}(\max) \times SS + FS_{LS}(\max) \times LS] \quad (2)$$

where $Coef_{corr}$ is the correction coefficient defined as the number of leaves per shoot at the period of defoliation divided by the maximal number of leaves per shoot, and $defol$ and $\max$ are the dates of defoliation and of the maximum of foliar surface, respectively.

Growth and nitrogen content of stems. In 2015, when the number of long shoots became constant (mid-July), 16 long shoot stems were randomly selected in each cropping system to measure stem fresh and dry masses as well as nitrogen content.

Growth and nitrogen content of fruits. We measured the diameter of 5 apples on 10 trees in each orchard every 10 to 15 days, from fruit set to harvest. In parallel, at each measurement date, 16 fruits were randomly picked in the orchard and their diameter, fresh and dry masses and nitrogen

content were measured. This allowed establishing an allometric relationship (Appendix 3.B) that made it possible to convert the diameter measurements into dry masses.

Soil texture, structure, dry mass proportion and chemical characteristics, including nitrate and ammonium content, were measured at the end of September in each cropping system. Soil samples were taken at 4 different locations in each orchard and at two depths (0 – 30 cm depth, and 30 – 60 cm).

3.2 STICS parameterization for apple orchards

To adapt STICS to apple fruit tree it was necessary to describe an important number of parameters, estimated by three ways (Appendix 3.C). First, direct measures in the field were used for parameters such as alley distance, maximal tree height or degree days between two phenological stages. Second, parameters such as optimal growing and limiting temperatures were taken from literature. STICS parameters estimated on grapevine - a perennial crop that represents so far the apple's closest crop to which STICS was adapted - were used, wherever this was coherent with apple. Third, some parameters were estimated using the data collected during this study and the least squares method. This estimation was done either on parametric curves included in the STICS model (e.g. potential growth of fruits), or globally, using the STICS model. The latter two types of estimation are detailed below.

3.2.1 Parametric curves

The critical nitrogen dilution curve defines the nitrogen demand under which, in accordance with its biomass, the crop faces a nitrogen stress. It is described by equation 3:

$$N = \text{adil} \times DM^{-\text{bdil}} \quad (3)$$

where N is the total nitrogen concentration of the tree (%) and DM is the sum of the dry masses of the leaves, fruits and stems of the tree (t/ha). Parameters adil and bdil were estimated using the three CON systems (Tab. 3.1 – Appendix 3.C), which received the highest amounts of mineral nitrogen fertilizer and were therefore unlikely to present nitrogen stress.

The fruit potential cumulative growth is defined in STICS as the sum of two functions: an exponential function describing the cell division phase and a logistic function describing the cell elongation phase, corresponding to the sink strength of fruits (Garcia de Cortazar-Atauri et al. 2009). For the two studied cultivars, the cell division is so fast that only the logistic function was used:

$$DMfru = 1/(1 + e^{-bfpf \times (T - afpf)}) \quad (4)$$

where *DMfru* is the normalized dry fruit mass (dry fruit mass divided by the maximal dry fruit mass) and *T* is the normalized julian day (julian day divided by the total number of days from full bloom to harvest). Parameters *afpf* and *bfpf* were estimated for each cultivar using the maximal dry mass measured at each sampling date (Appendix 3. C).

3.2.2 Global estimation

Nine parameters were selected for global estimation according to Ruget et al. (2002) sensitivity analysis on STICS parameters. The parameter estimation was only completed on cropping systems using the Golden Delicious cultivar; the LISR system was therefore not used. The Got_ORG2015 system was not used either because it encountered a high biotic stress. Therefore, six systems were used: Pu_LI2014, Pu_CON2014, Pu_LI2015, Pu_CON2015, Got_LI2015 and Got_CON2015. We estimated separately the parameters for 2015 in Pugère site, as these cropping systems were impacted by alternate bearing (see 3.1.1). A sequential module estimation method was used (Makowski et al. 2006), which proceeds in two successive optimizations of sets of parameters.

The first set of parameters describes global crop development: (i) *remobres*, which controls reserve remobilization; (ii) *efcroirepro* and *efcroiveg* that determine conversion efficiency; and (iii) *vmax2* that is directly linked to the crop's nitrogen nutrition. They were optimized using aboveground biomass and nitrogen quantity, as well as LAI for optimization forcing. The five other parameters describe crop's annual aboveground organ growth: (i) *dlaimaxbrut* that manages foliage components; (ii) *splaimin* and *spfrmin*, which determine minimal levels of trophic stress; and (iii) *afruitpot* and *pgrainmaxi* that are linked to yield formation. They were optimized using dry fruit mass and LAI.

3.3 Initialization and input data

The initialization date of each simulation unit in STICS was fixed on the 1st October of the n-1 year, which was considered as the beginning of apple tree's dormancy by the BRIN model (Garcia de Cortazar-Atauri et al. 2009). At this specific date, we estimated tree reserves using the method proposed by Garcia de Cortazar Aauri, (2006) for grapevine,. LAI was considered null as no leaf is yet developed at this stage. Soil nitrate and ammonium content were taken from soil analysis and water content was supposed to be at field capacity. Soil depth was fixed to 1 m for all systems according to experimental sites soil profiles. Mean root density at different soil layers was found in literature on apple tree (Green and Clothier 1999; Ma et al. 2013). Soil and climate inputs, which are described in

Figure 3.1, come respectively from the experimental station's soil profile analysis and from the meteorological stations. Appendix 2.C summarizes the soil characteristics of each cropping system.

3.4 Model evaluation

We assessed the model's goodness of fit on the cropping systems that were used for parameterization and evaluated the model on the three cropping systems which were not used for parameterization, i.e. Pu_LISR2014, Pu_LISR2015 and Got_ORG2015.

The criteria used were the relative root mean squared error (rRMSE), which is the root mean squared error divided by the mean observed value, and the modelling efficiency (Eff) (Greenwood et al. 1985) that compares the simulated and the observed variances. The smaller the rRMSE is, the closer to observed data the simulation is. High Eff values indicate that simulation outputs are more reliable than the mean value of observed data.

3.5 Ecosystem services and functions indicators and analysis

We carried out simulations of the STICS model for all studied cropping systems to analyze the cascading effects between soil plus climate and practices, ecosystem functions and then ecosystem services. The indicators of ecosystem functions and ecosystem services were taken from the STICS outputs. Each ecosystem service could be described by one or several indicators (Tab. 3.2). Soil nitrogen availability was described by (i) a long term indicator, i.e. organic nitrogen variation which represents the level of organic nitrogen stocked within the soil every year, and (ii) a short term indicator: the mean nitrate concentration in the first soil layer (0-30cm). For climate regulation, we considered nitrogen denitrification prevention, i.e. the yearly amount of denitrified nitrogen (intrinsically a disservice - (Zhang et al. 2007)) to which we assigned a minus sign for the sake of homogeneity among services: this way, a low level of the indicator indicates a low level of service. We also considered C sequestration in the soil and in the annual organs of trees. Water regulation was described by water content in soil (in % of dry soil), water drainage and nitrate leaching prevention, i.e. nitrate concentration in drained water to which we assigned a minus sign, as the case of nitrate leaching prevention is similar to that of prevention of N denitrification. Fruit production was described by yield (t/ha) and mean individual fresh fruit mass (g). The latter was calculated out of yield and crop load values at harvest.

Table 3.2: Ecosystem service indicators, abbreviated names and units.

Service	Indicator	Abbreviated name	Unit
Soil nitrogen availability	Yearly variation of organic nitrogen	varNorg	kg N/ha/year
	Mean nitrate concentration in 0-30 cm soil layer	meanNO3	mg N-NO3/kg of dry soil
Climate regulation	Prevention of N denitrification	N2Oprev	kg N-N ₂ O/ha/year
	Amounts of carbon fixed in soil and in the annual organs of the tree	Cseques	kg C/ha/year
Water cycle maintenance and regulation	Mean soil humidity in 0-30 cm soil layer	meanHum1	% soil dry mass
	Water drainage	Drainage	mm/year
	Nitrate leaching prevention	waterNO3prev	mg NO3/L of drained water
Fruit production	Yield	Yield	t/ha
	Mean individual fresh fruit mass (quality criterion for the market)	Fruitmass	g

The indicators of ecosystem functions supporting ecosystem services are given in Tab. 3.3. As mineralization and leaching affect soil nitrogen availability, cumulative quantities of nitrogen mineralized and leached for the simulation period were used as indicators. We described the carbon sequestered in soil by the amount of cumulative humified carbon (kg C/ha/year). In addition to that ecosystem function indicator, we considered net primary production in annual above-ground biomass (leaves, fruits and stems), using a mean carbon content value in leaf, fruit and stem (Appendix 3.D) and the maximal aerial biomass of the crop simulated by STICS. Fruit production may be influenced by stress due to nitrogen deficiency or stomatic water deficiency during the reproductive phase of the tree. Accordingly, we used indices of water and of nitrogen comfort. Concerning nitrogen uptake, the indicator was the maximal quantity of nitrogen present in the annual organs (leaves, fruits and stems).

Table 3.3 : Ecosystem functions indicators, abbreviated names and units.

Function	Indicator	Abbreviated name	Unit
Mineralization	Quantity of N mineralized	Nmineralized	kg N/ha/year
Leaching	Quantity of N leached	Nleached	kg N/ha/year
Humification	C sequestrated in soil	Cseques_soil	kg C/ha/year
Carbon sequestration	C sequestrated in tree's annual organs (fruits, leaves, stems)	Cseques_tree	kg C/ha/year
Water use for fruit production	Mean stomatic water sufficiency index (index varying between 0 –high water stress- to 1 –no stress)	Watercomfort	dimensionless
Nitrogen nutrition	Nitrogen nutrition index (NNI: index varying between 0 –high nitrogen stress- to 1 –no stress)	NNi	dimensionless
Nitrogen uptake	Maximal nitrogen quantity absorbed by the annual organs	Nabsorbed	kg N/ha
Fruit set	Fruit number per tree	Crop load	dimensionless
Carbon allocation	C quantity in fruits at harvest	Cfruit	kg C/ha

We analyzed ecosystem functions and ecosystem service values in the 9 studied cropping systems using correlations and simple graphics. The ecosystem service profiles were represented by means of radar plots, with each ecosystem service value normalized with respect to the maximal value of the service over the 9 studied cropping systems. In the case of indicators of disservices, i.e. when prevention of N denitrification and nitrate leaching prevention had negative values, we used 1 minus the normalized absolute value for the sake of homogeneity with the case of services. In this way, a value close to zero on the radar plot indicated a low level of service and a value close to 1 a high level of service.

4. Results

4.1 Model parameterization and evaluation

The values of model parameters are presented in Appendix 3.C. The critical nitrogen dilution curve (equation 3) parameters were estimated at $adil=2.3 \pm 0.11$ and $bdil=0.51 \pm 0.042$. Further details are

given in Appendix 3.E. The curve of fruit potential growth of Golden Delicious cultivar (equation 4) is presented on Figure 3.2. The values of the Golden Delicious cultivar parameters were estimated at $\text{bfpf}=6.46 \pm 0.33$ and $\text{afpf}=0.67 \pm 0.014$ and those of the Crimson Crisp cultivar were estimated at $\text{bfpf}=5.53 \pm 0.42$ and $\text{afpf}=0.75 \pm 0.031$.

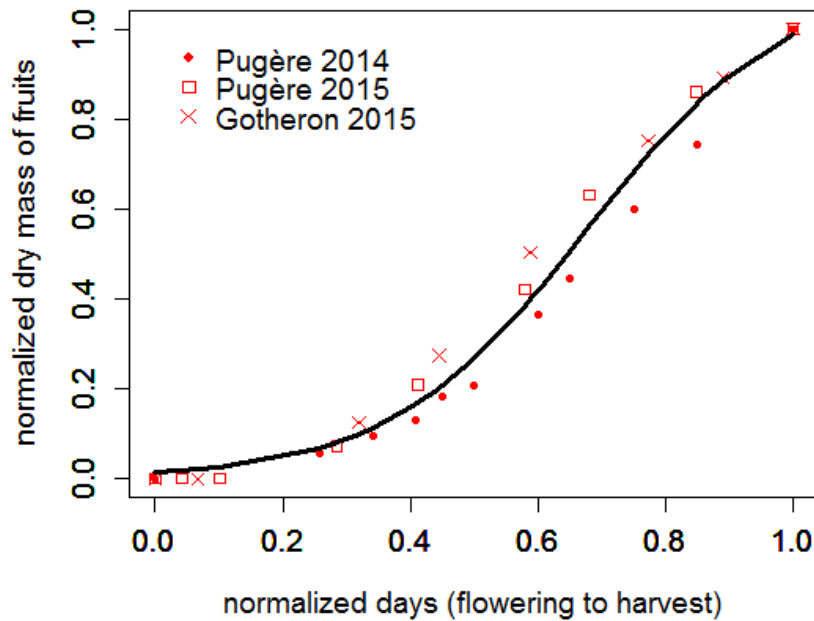


Figure 3.2: Potential fruit growth of the Golden Delicious cultivar. Dots represent observed data and the line represents the adjusted curve.

The global (all systems pooled) comparison of simulated and observed key variables over the growing season showed a satisfactory agreement (Fig. 3.3). The relative root mean squared error was less than 30% for LAI. The model efficiency for fruit biomass and annual aboveground biomass reached respectively 0.92 and 0.89. However, the confrontation of observed and simulated absorbed nitrogen quantity in aboveground biomass showed a lot of dispersion and the model efficiency was low (0.11).

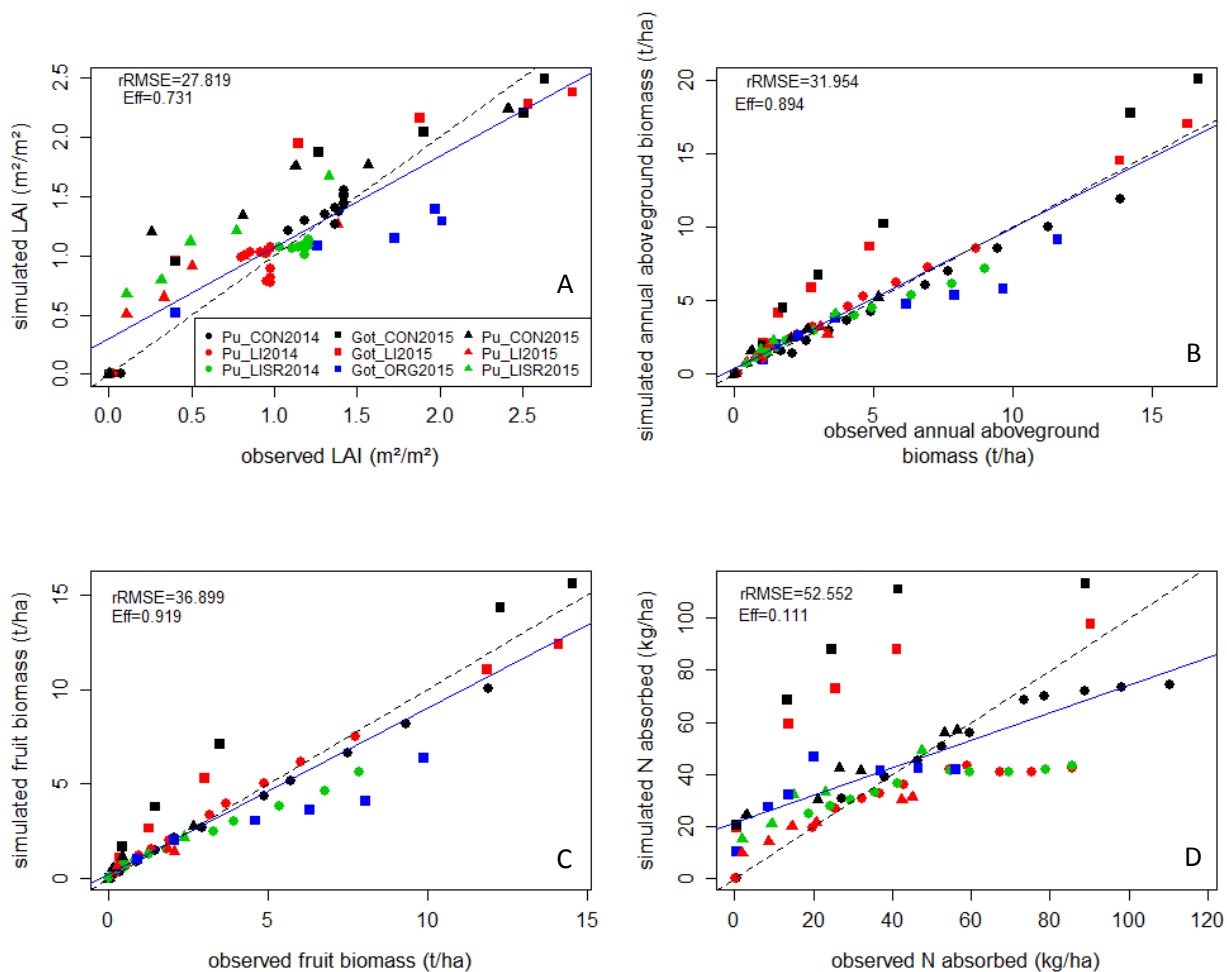


Figure 3.3: Comparison of observed (x-axis) and simulated (y-axis) leaf area index LAI (A), annual aboveground biomass (B), fruit dry biomass (C) and absorbed nitrogen quantity in aboveground biomass (D) for all pooled cropping systems. $r\text{RMSE}$ is the relative mean squared error and Eff the model efficiency. Blue lines are regressions of simulated on observed data. Dotted lines are the first bisectors of simulated and observed data.

Figure 3.4 presents the dynamics of observed and simulated key variables on the 9 studied cropping systems. Globally, there was a good agreement between simulated and observed dynamics of LAI, fruit dry biomass and aboveground dry biomass. Observed LAI values in Got_ORG2015 system were lower (1.4 for LAI_{max}) than in Got_LI2015 and Got_CON2015 (respectively 2.4 and 2.5) due to the orchard low vigor. A small gap was observed between observed and simulated LAI in all cropping systems, suggesting that effective foliar surface developed slightly faster than the simulated one. Maximum LAI was significantly lower in Pugère 2014 (respectively 1.5, 0.9 and 1.2 in CON, LI and LISR systems) than in 2015 and than in Gothenon site. Such low values may be due to an attack of *Marssonina rosae* on apple tree leaves around mid-July that was simulated by leaf removal in the STICS model. Aboveground and dry fruit biomasses were correctly estimated by the STICS model. Organic systems presented almost half the values of both conventional and low input systems, with 7.61 t/ha in Got_ORG2015 and 14.81 and 16.36 t/ha in Got_LI2015 and Got_CON2015, respectively.

Pugère 2015 aboveground biomass values were much lower than in 2014 since 2015 was an “off-crop” year, with significantly less fruits per tree.

The simulated dynamics of nitrogen absorption in Gotheron systems matched the observed dynamics in terms of maximal nitrogen absorption, but it presented a time lag, as the observed maximal nitrogen amount was reached earlier than the simulated value. This could be explained by the faster observed foliar surface development compared to the simulated one (i.e. leaves and stems rich in N). The STICS model over-estimated the tree’s nitrogen quantity in Pugère site in 2014 as well as in Got_ORG2015.

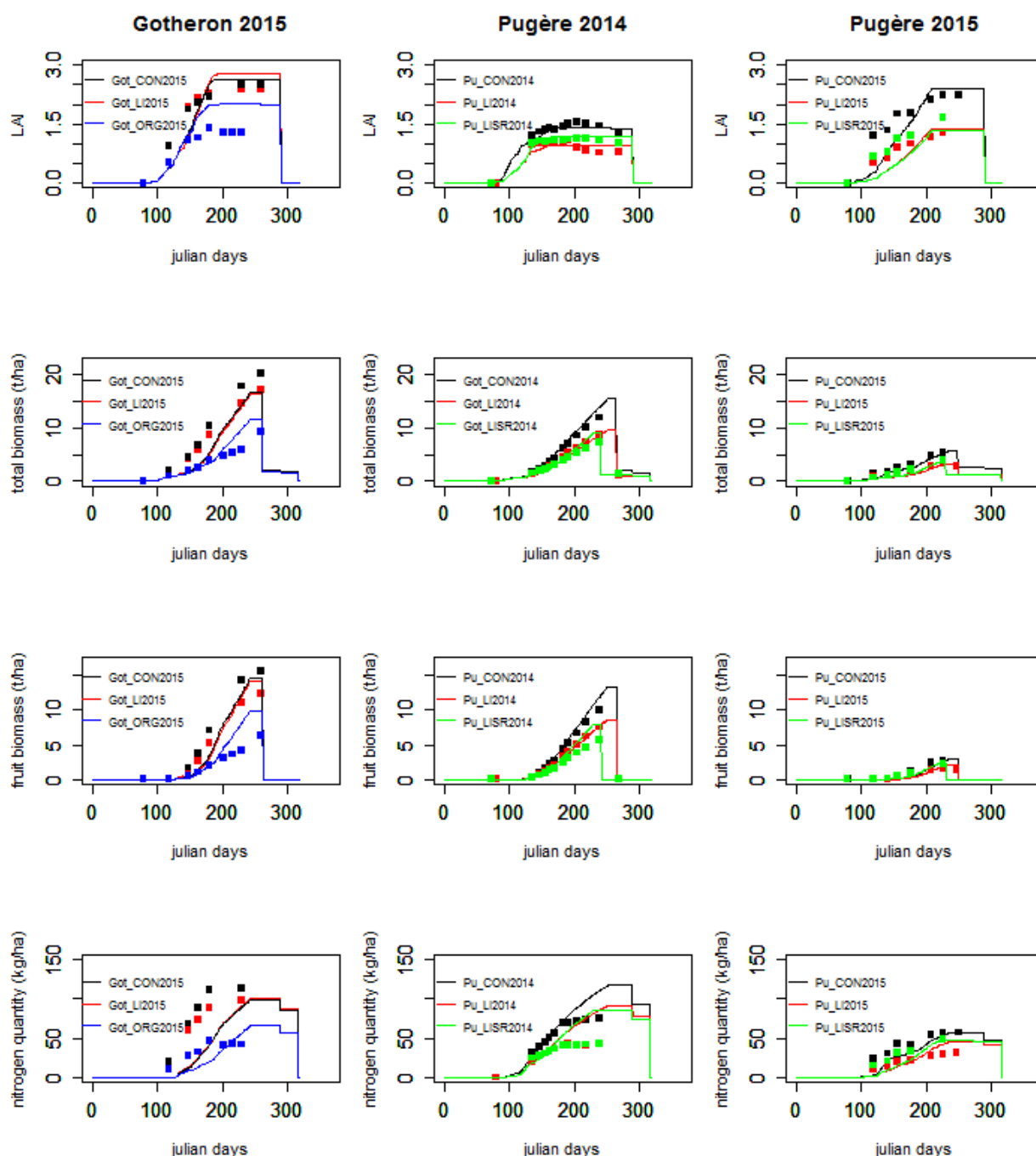


Figure 3.4: Simulated (lines) and observed (dots) dynamics of LAI, aboveground biomass, dry fruit biomass and nitrogen amounts in aboveground biomass in the 3 studied cropping systems in Gothen and La Pugère experimental sites.

4.2 Analysis of ecosystem services

4.2.1 Values and correlations of ecosystem service indicators

Ecosystem service indicator values are presented for each of the 9 cropping systems on Tab. 3.4. Soil organic nitrogen variation was negative in all systems and the highest absolute values were found in

Pugère site, meaning that more humified nitrogen was mineralized. The lowest absolute value was found in Got_ORG2015.

Mean soil nitrate concentrations were lower in Gotheron than in Pugère, probably due to Gotheron's soil higher infiltrability, especially in the first soil layer. Pu_CON2014 received twice as much nitrate amounts as in Pu_LI2014, but showed lower mean nitrate concentration values.

Globally, all cropping systems presented low N denitrification (i.e. high N denitrification prevention). There was no denitrified nitrogen in Gotheron due to high infiltrability that prevents water stagnation, an important factor for the process of denitrification. Highest values were found on Pu_LI2014 (0.66 kg N/ha/year).

C sequestration reached high amounts in Pu_CON2014, Got_LI2015 and Got_CON2015 systems (respectively 5326, 6196 and 6373 kg C/ha/year), despite the differences in planting density (2000 versus 1000 trees/ha). In 2015, as apple production was considerably low in Pugère, carbon sequestration values significantly decreased. In LI and LISR systems, values were even negative, as soil's CO₂ release was more important than the carbon fixed in annual organs of the trees.

All cropping systems had the same irrigation management based on the soil humidity at field capacity in order to meet the plants requirements. Soil humidity values ranged between the water field capacity and the wilting point in Pugère while in Gotheron, because of high infiltrability and pebbles, humidity tended to fall below the wilting point within the first 30 cm.

Globally, similar amounts of drained water were found in all systems due to their similar irrigation management. Got_ORG2015 presented the highest drainage value (472 mm/year) which may be due to its very pebbly soil (50% pebbles). Water nitrate concentration highest values (i.e. lowest values of the indicator of nitrate leaching prevention) were found in 2015 on Pugère site and the lowest were found in Got_ORG2015.

In Gotheron, simulated yield ranged from 75 t/ha in CON system to 36 t/ha in ORG system. Yield fell to 11 t/ha in 'off-crop' year in Pugère.

Fresh fruit mass was higher in Pu_LISR2014, which could be linked to the characteristics of the Crimson Crisp® cultivar. However, it was not the case in 2015, when alternate bearing may have erased the cultivar effect.

The strongest correlations between ecosystem service indicators (Tab. 3.5) involved services that were directly linked to nitrogen, water and carbon transfers within the soil compartment.

Regarding nitrogen-related services, organic nitrogen variation and prevention of N denitrification were strongly and negatively correlated. We could explain that with the following sequence: when the stock of organic nitrogen decreases, mineral nitrogen increases due to mineralization and therefore nitrogen denitrification is more likely to occur. Similarly, prevention of N denitrification and mean soil nitrate concentration were negatively correlated as denitrification occurs in case of high nitrate concentrations in soil.

Regarding water-related services, since the mean soil humidity influences the mineralization process, as well as nitrate transport within the soil, mean soil humidity was positively correlated to mean soil nitrate concentration. Negative correlations occurred between organic N variation and mean soil humidity. These two ecosystem services are linked by the mineralization function. Prevention of N denitrification was negatively correlated to mean soil water humidity as denitrification mostly occurs in anoxic soils due to waterlogging.

Regarding carbon-related services, yield was positively correlated to carbon sequestration but more unexpected results were observed between yield and nitrogen-related services: there was no strong correlation between soil mean nitrate concentration and yield or sequestered carbon. Furthermore, yield seemed positively correlated to drainage, but it was only a confounding effect related to Pugère site (Appendix 3.A). In fact, in Pugère in 2015, there was at the same time a low rainfall (thus a low drainage) and a low fruit production because of alternate fruit bearing. Mean fresh fruit mass did not show any strong correlation with other services. These low correlations could be explained by the strong effect of soil characteristics as well as the difference in tree age.

Table 3.4: Values of ecosystem services indicators simulated by the STICS model in the 9 studied cropping systems. See Table 3.2 for the meaning of the abbreviated names.

Cropping systems	varNorg	meanNO3	N2Oprev	Cseques	meanHum1	drainage	waterNO3prev	yield	FruitMass
Pu_CON2014	-162.77	6.20	-0.61	5326	22.42	428	-30.51	68.13	104
Pu_LI2014	-160.54	7.03	-0.66	2745	22.41	394	-31.92	43.72	165
Pu_LISR2014	-150.44	6.36	-0.52	2597	21.89	352	-25.52	48.15	232
Pu_CON2015	-169.16	6.51	-0.53	819	22.13	236	-34.91	16.19	139
Pu_LI2015	-170.66	7.56	-0.56	-146	22.17	270	-38.13	11.42	181
Pu_LISR2015	-166.50	7.28	-0.52	-9	22.15	277	-30.83	16.03	166
Got_CON2015	-95.81	4.66	-0.00	6373	8.22	399	-21.06	75.17	215
Got_LI2015	-106.13	4.63	-0.00	6196	8.20	393	-22.57	73.64	225
Got_ORG2015	-89.29	2.57	-0.00	2787	5.98	472	-3.74	35.73	187

Table 3.5: correlation matrix of ecosystem service indicators in the 9 studied cropping systems. *: p< 0.05; **: p < 0.01; *: p < 0.001.**

	varNorg	meanNO3	Cseques	N2Oprev	meanHum1	drainage	waterNO3prev	yield	FruitMass
varNorg	1.000								
meanNO3	-0.929***	1.000							
Cseques	-0.963***	0.878**	1.000						
N2Oprev	0.646	-0.553	-0.574	1.000					
meanHum1	-0.983***	0.918***	0.986***	-0.596	1.000				
Drainage	0.686*	-0.723*	-0.502	0.722*	-0.607	1.000			
waterNO3prev	-0.879**	0.947***	0.788*	-0.415	0.836**	-0.745**	1.000		
Yield	0.570	-0.458	-0.480	0.984***	-0.499	0.712*	-0.358	1.000	
FruitMass	0.571	-0.339	-0.580	0.231	-0.526	0.138	-0.399	0.266	1.000

4.2.2 Correlations between ecosystem service and ecosystem function indicators

The correlations between ecosystem services and ecosystem function in the 9 studied systems are shown on Table 3.6. Organic nitrogen variation was positively correlated to soil carbon sequestration (i.e. humification) and negatively correlated to N mineralization, which is the exact opposite process. We did not observe a strong correlation between mean soil nitrate concentration (ecosystem services) and nitrogen absorption (ecosystem function). This weak correlation could be due to the orchard's age difference between Gotheron and Pugère sites. Furthermore, 2015 was an off-crop year, reducing the tree's N absorption. N leaching prevention (ecosystem service) was explained by the functions linked to soil nitrate inputs and losses such as mineralization and leaching. It was also negatively correlated with carbon sequestration in soil, as the humification process includes both carbon and nitrogen immobilization into more stable components.

Water-linked services (drainage and mean soil humidity) had a special status compared to other services, as they can impact ecosystem functions. Negative correlation between soil organic nitrogen variation (ecosystem service) and water comfort (ecosystem function) could be explained by N mineralization, which is enhanced by mean soil humidity (ecosystem service) (i.e. directly linked to water comfort). N mineralization decreases soil organic nitrogen stock. A positive correlation between drainage (ecosystem service) and tree C sequestration (ecosystem function), including C in fruit, as well as crop load (ecosystem functions) was found, which was a confounding effect caused by the Pugère site as previously indicated (see 4.2.1: coincidence between a low rainfall and a low fruit production in this site in 2015). The prevention of N denitrification (ecosystem service) was surprisingly positively correlated to water comfort (ecosystem function) and C sequestration in soil (ecosystem function). This was due to a soil effect. In fact, Gotheron soil presented a high infiltration capacity, which prevented N denitrification. No correlations were found between this ecosystem service and the two ecosystem functions, when only considering Pugère site.

Carbon sequestration mostly derived from C sequestered in the tree. Leaf, stem and fruit development depends on the quantity of nitrogen absorbed. Therefore, carbon sequestration was positively correlated with N absorption. Finally, yield was positively correlated to tree carbon sequestration and carbon in fruits, driven by crop load. These functions support the provision service. But yield was also impacted by functions like nitrogen or water absorption. Yield was strongly correlated to nitrogen absorption, but water and nitrogen comfort indices did not present important correlations with yield, because their values were not significantly different among the cropping systems (Appendix 3.F).

Table 3.6: Correlation matrix of ecosystem services (rows) and ecosystem functions (columns) indicators. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.001$. See Tables 3.2 and 3.3 for the meaning of the abbreviated names.**

	Nmineralized	Nleached	Cseques_soil	Cseques_tree	Nabsorbed	NNi	Watercomfort	Crop load	Cfruit
varNorg	-0.989***	-0.646*	0.991	0.565	0.172	-0.375	-0.818	0.456	0.580
meanNO3	0.953***	0.746*	-0.954	-0.471	-0.082	0.585	0.653	-0.326	-0.476
N2Oprev	0.940***	0.672*	-0.944	-0.494	-0.069	0.307	0.883	-0.301	-0.491
Cseques	-0.558	0.102	0.567	0.995*	0.849**	0.254	-0.723	0.882**	0.992***
meanHum1	0.967***	0.665*	-0.970***	-0.514	-0.093	0.383	0.857	-0.357	-0.519
drainage	-0.694*	-0.204	0.691*	0.684*	0.519	-0.378	-0.421	0.763*	0.730*
waterNO3prev	0.932***	0.793*	-0.928***	-0.327	0.018	0.698*	0.502	-0.304	-0.358
yield	-0.482	0.192	0.490	0.987*	0.902***	0.323	-0.654	0.931***	0.995***
FruitMass	-0.554	-0.372	0.553	0.178	0.015	0.034	-0.580	0.235	0.214

4.2.3 Impact of pedoclimatic conditions and agricultural practices on ecosystem functions

We focused on the ecosystem functions presenting high correlations with related ecosystem services (Fig. 3.5). When taken separately, the impacts of soil, climate and isolated agricultural practices on apple orchards are already well-known. In our study, the STICS model enabled to consider complex combinations of cropping systems with their respective soil and climate conditions.

All functions were strongly impacted by a site and/or year effect. This effect was either due to soil and/or climate, to cropping system management, or to the combination of both. Pugère 2015 results showed lower values for yield, C sequestrated in annual organs of the tree and crop load due to the alternate bearing effect. N mineralization was impacted by soil characteristics: it was much lower in Gotheron than in Pugère because of the pebbles in Gotheron soil. N mineralization was also impacted by irrigation (Fig. 3.5), because it relies on water stimulated biological activity.

As shown on Figure 3.5, water comfort was impacted by soil characteristics. It was lower at Gotheron than at Pugère, because of a lower retention capacity of the soil. This difference was somehow marginal as we used a mean value of the stomatic water sufficiency index between fruit set and harvest (i.e. the index might have fallen lower during this period). Soil also impacted denitrification as it did not occur in Gotheron, where non-stagnant water was encountered (high infiltrability).

Fertilization impacted soil carbon sequestration, particularly in organically fertilized systems as Got_ORG2015 that saved about 200 kg C/ha/year (Appendix 3.F; i.e. difference between 1030 and 850 kg C/.ha/year), compared to minerally fertilized systems (Got_CON2015 and Got_LI2015). On the other hand, mineral fertilization increased tree carbon sequestration through N absorption. In Gotheron, the organic system showed weaker tree vigor than the two other systems, creating less aboveground biomass. However, tree nitrogen absorption was also impacted by planting density: the highest value of absorbed nitrogen (117 kg N/ha) was found in Pu_CON2014, where the planting density reached 2000 trees/ha.

Irrigation predominantly impacted N mineralization. For N leaching, there was a clear fertilization effect, but an unclear irrigation effect. In fact, the organically fertilized system, presented, as expected, the lowest N leaching values, as opposed to minerally fertilized systems. However, non-fertilized systems showed almost as high N leached values as minerally-fertilized systems. This could be explained either by a soil effect (Pugère's soil was rich and presented a high mineralization rate, creating more mineral nitrogen potentially leached with heavy rains), or by the "off-crop" effect of 2015. Indeed, the N uptake by trees was lower in the systems corresponding to the off-crop year

than in the other systems, thus leading to more available N in the soil, potentially leached by heavy rains. Irrigation impacts on N leaching may have been blurred by climate impact and more specifically heavy rains. With regard to yearly water balance highlighted in Appendix 3.A, there was water excess in all cropping systems, with less water excess in Pugère in 2015. In the first case, heavy rainfall (or the so-called “Cevenol” episodes in southeastern France) could have induced important N leaching, especially in Pugère, where mineralization is important.

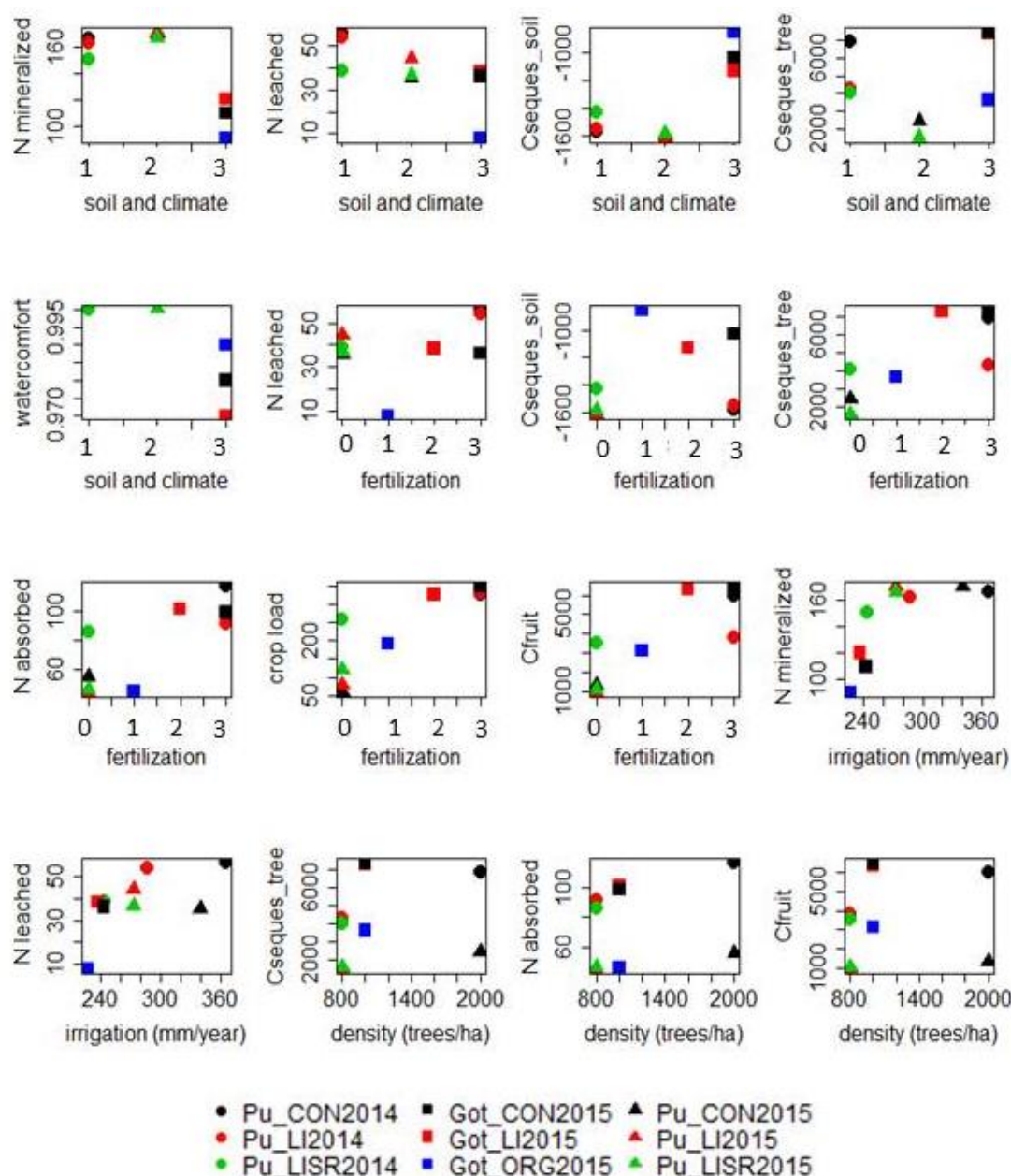


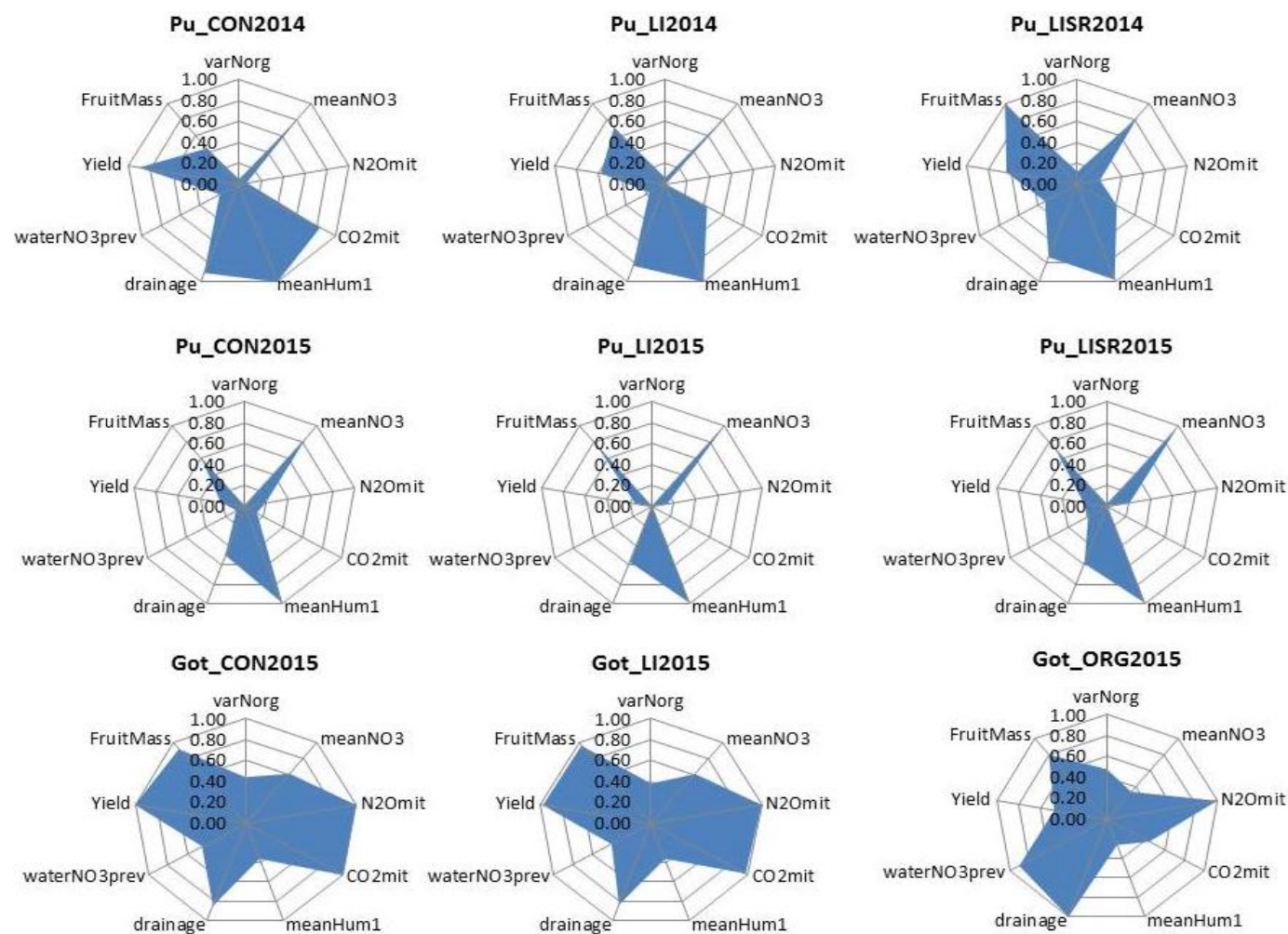
Figure 3.5: Impacts of pedoclimatic and agricultural practices on ecosystem functions strongly correlated to ecosystem services for the 9 studied cropping systems. On the x-axis, for soil and climate: 1= Pugère 2014, 2= Pugère 2015, 3 = Gotheron 2015. For fertilization: 0 = no input, 1 = organic input, 2 = organo-mineral input, 3 = mineral input

4.2.4 Linking pedoclimatic conditions and agricultural practices to ecosystem service profiles

Figure 3.6 presents the ecosystem service profiles of the studied cropping systems. In Pugère site, profiles were mostly drawn by the heavy character of soil, which yielded high values of mean soil nitrate concentrations as well as soil humidity. Furthermore, Pugère's soil presented a high mineralization capacity, which by the way considerably reduced organic nitrogen storage. On what soil is concerned, Gotheron's soil high infiltrability, especially in the first soil layer, also impacted some services, such as mean soil humidity and mean nitrate concentration.

Regarding the 2014 profiles, Pu_CON2014 showed the most contrasted profile with high yield and carbon sequestration (mostly due to carbon sequestration in trees) but low N denitrification and leaching prevention. This is mainly linked in the first place to Pugère's soil, which had a high mineralization capacity and retained water, the most important factor inducing denitrification. In view of the results obtained in Figure 3.5, Pu_CON2014 high planting density impacted carbon tree sequestration and its high mineral fertilization impacted yield build-up as well as water and air pollution through respectively leaching and denitrification. Pu_LI2014 profile was very similar to CON, but with smaller yield mostly due to a lower tree density, and thus a lower C sequestration. Pu_LISR2014 profile appeared more balanced (Fig. 3.6) with less water and air pollution - as it was not fertilized in 2014 – and higher fresh fruit mass value due to cultivar characteristics. On Pugère site in 2015, all systems presented similar ecosystem service profiles: there were no fertilizer inputs in any of the three systems and 2015 was an 'off-crop' year, decreasing considerably yield and sequestered carbon. These last two services presented higher values in Pu_CON2015 which had a higher planting density. Despite the no fertilization management, N denitrification and leaching remained high, because of the soil high retention capacity. Lower drainage values were observed in Pugère 2015, as it received lower rainfall amounts that year.

On Gotheron site, service profile radars were more balanced than on Pugère (Fig. 3.6). Got_LI2015 and Got_CON2015 had similar profiles, with high fruit production and high carbon sequestration due to the tree's age and mineral fertilization. However, water pollution was important on these two systems, because of a high level of mineral fertilization. The ORG profile was different. As it was organically fertilized, it showed, on the one hand, smaller yield and lower carbon sequestration due to nitrogen stress (and therefore lower tree development), but on the other hand lower nitrate concentration in soil and drained water. The orchard's age seemed to have the most important impact on yield, as Got_CON2015 and Got_LI2015 presented the highest yields despite their low planting density compared to Pu_CON2014.



1

2 Figure 3.6: Ecosystem services profiles on radar plots for the 9 studied cropping systems. Ecosystem services are (from the top clockwise): soil organic nitrogen variation (varNorg), mean soil
3 nitrate concentration (meanNO3), C sequestration (Cseques), prevention of N denitrification (N2Oprev), soil humidity for first soil layer (0-30 cm) (meanHum1), drainage, nitrate leaching
4 prevention (waterNO3prev), yield and fresh fruit mass (FruitMass). For each service, values are normalized, i.e. they are relative to the maximal value observed over the 9 studied cropping
5 systems. A value close to zero on the radar plot indicates a low level of service and a value close to 1 a high level of service.

5. Discussion

5.1 Adaptation of the STICS model to apple orchards

Beyond fruit growth models (e.g. Lakso et al., 1999), architecture (e.g. Costes et al., 2008, 2003) and bioeconomic models (e.g. Hester and Cacho, 2003), there are not many models which are, to our knowledge, adapted to integrated apple tree development and at the same time consider the interactions between tree and soil. In this study we adapted a current generic model – already adapted to various crops – to apple, in order to evaluate different ecosystem services. The results obtained for the main studied variables allow us to be quite confident in the capacity of the model to support ecosystem services analysis. Simulated values of the LAI by STICS were in agreement with the range of values encountered in the literature for apple trees (Palmer et al. 1992; Cheng and Raba 2009; Zanutelli et al. 2013). Moreover, aboveground biomass dynamics (leaves, fruits and stems) were well reproduced by the model and fitted accurately to the observed data. The observed fruit yield, which was in the range of usual yields in apple orchards (Robinson et al. 1991a; Peck et al. 2006; Zanutelli et al. 2013), was well reproduced by the model.

Although simulated values of nitrogen uptake by the tree, which ranged from 45 to 117 kg/ha, were close to the values found in literature - 35 to 137 kg N/ha/year (Nesme et al., 2009), they did not fit well to observed values. These differences can be partially explained by the delay in the simulation of foliar development, which could in turn be due to two major points. First, nitrogen remobilization from tree reserves was not considered in our case, as we did not work on multi-annual simulations. Therefore, nitrogen in fruits, leaves and stems was considered as the only source of nitrogen for the tree, together with a potential remobilization of the initial nitrogen, which is only called upon if the newly formed assimilates fail to satisfy the demand of the tree (Brisson et al. 2009) (i.e. not the case in our study). In the future, using the STICS research version that has been adapted for *Miscanthus x giganteus* (Strullu et al., 2014; 2015) should permit to consistently deal with the nitrogen compartmentalization within the whole plant, including perennial reserves. Furthermore, the dilution curve approach may not be the most adequate representation of apple tree's nitrogen content. In fact, fruit may contain high concentrations of reserve water-soluble carbohydrates, which consequently reduces the concentration of nitrogen and therefore the crop critical nitrogen concentration (Hoogmoed and Sadras 2016). It is worth noting that, for the moment, no field method is yet available to estimate apple tree nitrogen requirements.

In the STICS model we considered carbon sequestration only in annual organs (leaves, fruits and stems), without considering the annual wood production coming from structural branches, trunk and roots. In the Gotheron site, the tree wood dry mass (i.e. roots, trunk and main branches) reached

10780 $\pm$ 2190, 11770 $\pm$ 1450 and 9270 $\pm$ 2000 kg C/ha within 10 years-time on Got_CON2015, Got_LI2015 and Got_ORG2015 cropping systems, respectively (Appendix 3.G). If we assume that annual wood production is similar each year, this production would be about 1060 $\pm$ 206 kg C/ha/year, which is lower than the mean value obtained in the annual production simulations, i.e. 6121 kg C sequestrated/ha/year in annual organs (leaves, fruits and stems) on “on-crop” years. However, this would not be negligible in the case of “off-crop” situations like the Pu_LI2015 and Pu_LISR2015 cropping systems where the only consideration of C sequestrated in annual organs yielded negative values. By adding tree aboveground annual wood production obtained from our measurements to simulated carbon in leaves, fruits and stems of the Gotheron cropping system, we found total values of carbon annually fixed close to the mean value of 8540 kg C/ha/year found in apple orchards by Zanutelli et al. (2015) (Zanutelli et al. 2015).

STICS simulates a hardly accessible variable, which is the annual amount of humified carbon in the soil. In the studied cropping systems, negative values of soil C sequestration and organic nitrogen variation are explained by the process of humus mineralization. However, as STICS simulations were annual, we did not consider the potential fresh organic matter returned to soil the next year, coming from grass covers as well as root residues. On the long term, this fresh organic matter may significantly increase the soil’s organic nitrogen and carbon content, which is used in carbon sequestration through humification.

Another limit of the model for apple orchards is that it was simulated for a bare soil, whereas most commercial orchards present a grass cover. Therefore, N leaching and denitrification may have been overestimated if we consider that grass covers retain a certain amount of nitrates. Simulating the combination of a grass cover and a main crop is possible in the STICS model but requires a good knowledge of the grass’s physiology, especially its nitrogen and water needs. Further research is needed to characterize and introduce these grass covers in crop models.

5.2 Analyzing the impact of pedoclimatic conditions and agricultural practices on ecosystem services

In our study, the impact on ecosystem services profiles of cropping systems and of pedoclimatic characteristics are considered together. Pugère soil being composed of ancient lowlands, it retained water and nitrogen and tended to have a greater mineralization rate as well as higher N denitrification compared to Gotheron soil that was shallow and pebbly.

Off-crop years such as 2015 in Pugère reduced considerably the provision of some ecosystem services, not only of fruit production but also of regulation services such as denitrification or leaching

prevention: in soils with a high mineralization potential, as in Pugère, nitrogen can be in excess within the soil due to the fact that the “off-crop” characteristic reduces nitrogen needs and thus its absorption by the trees. This nitrogen excess in soil is more likely to be leached. Off-crop situations may be caused by many different factors such as a reduction of the number of flower buds differentiated under low light (Grappadelli 2003), a low temperature (Koutinas et al. 2010), a strong crop load the previous year, or by hormonal effects. Unfortunately, to our knowledge, no model currently represents this alternate bearing.

Organic fertilization had a clear effect on multiple ecosystem services. It increased, on the one hand, services such as water cycle maintenance through water pollution reduction, or long-term nitrogen availability with a low use of the soil organic nitrogen stock. On the other hand, it decreased carbon sequestration in trees through loss of tree vigor due to nitrogen stress impact, thus considerably reducing yield and C sequestration.

Planting density was the second most impacting agricultural practice: obviously, a high density increased carbon sequestration as well as yield when accounted per hectare. However, in high density orchards a ceiling value for C sequestration may be reached on the long term because of possible competition for light among trees. High planting density also increased nitrogen needs. In high density orchards, if the nitrogen inputs are well applied – that is, not before a heavy rain – no N leaching occurs. On the other hand, as seen before, if the soil has an important mineralization rate, in a low density orchard, less nitrogen will be absorbed and more mineral nitrogen could be potentially leached.

As all irrigation systems were managed according to the tree demand, the simulations did not show any important water deficiency for the tree. Further experimental research is needed to understand the consequences of different levels of water stress on ecosystem services in apple orchards.

The observation of multiple sites and more diversified cropping systems together with the consideration of other agricultural practices (grass cover, pruning, ...) is required to ascertain the observed trends and enlarge the scope of the study, but this type of approach already enables to compare ecosystem services profiles according to cropping systems variability. It also provides references on N and C cycles in orchards, which could be useful for the evaluation of environmental impacts by lifecycle analysis (Alaphilippe et al. 2013).

6. Conclusions

In this study, the complexity of an apple orchard functioning was largely regarded by the use of models, enabling to link three major entities: agricultural practices plus pedoclimatic conditions, ecosystem functions, and ecosystem services.

The STICS model was parameterized and evaluated using nine orchard cropping systems in two different experimental sites. The STICS model helped clarify the complexity inherent to the studied orchards, which were managed with a system approach and encountered different pedoclimatic conditions. It helped analyze the links between agricultural practices and soil and climate characteristics, ecosystem functions and ecosystem services, and hierarchize their effects.

Although some formalisms still have to be improved in the STICS model to simulate more accurately the functioning of an apple orchard, especially those implying reserve compartments or grass cover impacts on soil functions, the current version of the STICS model, by providing access to hardly measurable data, was particularly powerful for analyzing ecosystem services. Thereafter, STICS could be successfully used to study, by means of intensive simulations, which pedoclimatic conditions and agricultural practices sets provide the desired ecosystem service profiles in apple orchards.

More generally, this work on apple orchards demonstrates that the use of agroecosystem models is a promising route for the analysis and management of multiple ecosystem services in agroecosystems. They could play a significant role in the design of sustainable apple orchard cropping systems and for the dialogue between fruit growers and other stakeholders that is required for this design.

Acknowledgments

We would like to acknowledge Frédéric Bouvery for his valuable experimental assistance during all experimental campaigns. We thank Solène Borne as well as the technical team of Gotheron site for their help in field organization. The work was funded by an industrial agreement of training through a research CIFRE fellowship from the Ctifl (Centre technique d'Interprofession des Fruits et Légumes) and the ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) on behalf of the French Ministry of Higher Education and Research and the "Casdar N pérennes" project.

CHAPITRE 4 : IPSIM-POMMIER



«IPSIM-POMMIER » : OUTIL D’EVALUATION DE LA SEVERITE DES DEGATS DE BIOAGRESSEURS EN VERGERS DE POMMIERS

Résumé

La réduction conjointe de l’impact des bioagresseurs et de l’usage des pesticides est un des enjeux majeurs de la filière fruits. L’estimation des dégâts occasionnés par les bioagresseurs combinée à celle de la réduction de l’usage des pesticides pourrait être le reflet du service de contrôle des bioagresseurs fourni par un agroécosystème comme le verger de pommiers, sous l’influence des pratiques culturales. Le cadre de modélisation IPSIM est adapté à ces estimations car il permet de considérer de manière intégrative les impacts de l’ensemble des opérations de protection du verger, ainsi que des conditions du milieu, sur les dégâts causés par les bioagresseurs à une culture. Ce chapitre décrit la conception du modèle IPSIM-Pommier, adapté aux trois bioagresseurs principaux du pommier dans le sud-est de la France : le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure. Le modèle associe et hiérarchise les effets des pratiques culturales et des conditions du milieu sur les dégâts de ces bioagresseurs, à partir d’une étude bibliographique et de dires d’experts du sud-est de la France. Il simule un niveau de dégâts pour chaque bioagresseur du pommier, sur un système de culture donné. La qualité d’ajustement du modèle a été évaluée à partir de données recueillies en 2014 et 2015 sur un total de 12 systèmes de culture dans deux dispositifs expérimentaux. Les gammes de valeurs de dégâts observés ne dépassent pas, pour la majorité des systèmes étudiés, les valeurs simulées par le modèle IPSIM-Pommier. Ce dernier pourrait être un outil performant pour évaluer le niveau de contrôle des bioagresseurs principaux des pommiers pour un système de culture donné. Cependant, il nécessite d’être évalué sur un nombre de systèmes de culture plus élevé et dans d’autres régions de France.

Mots-clés : Bioagresseurs, verger de pommiers, dégâts, système de culture, modélisation qualitative, IPSIM

1. Introduction

La France fait partie des plus gros pays producteurs et exportateurs de pommes dans le monde, avec plus de 650 000 tonnes exportées chaque année pour une production annuelle nationale de 1.82 millions de tonnes (Serrurier 2013a). Aujourd'hui, ce fruit est l'un des plus consommés dans le monde, et occupe la plus grande surface de production de fruits française : 43 770 ha (Serrurier 2013b). Son intérêt économique est donc essentiel pour beaucoup de professionnels, soit 7 590 exploitations agricoles (Agreste 2011). L'ampleur du marché de la pomme en France s'explique notamment par le recours aux produits phytopharmaceutiques* contre les bioagresseurs*, qui permettent de préserver les potentiels de rendement et l'aspect des fruits.

Cependant, comme toutes les productions fruitières, la pomme est confrontée à de nombreux enjeux économiques, environnementaux, sanitaires, techniques et réglementaires. D'une part, l'utilisation des produits phytopharmaceutiques pose des problèmes de pollution des sols, de l'air et des eaux (Dick 1997; Aoyama and Nagumo 1997; Mottes et al. 2014). De plus, bien que le verger soit un milieu propice à la permanence des chaînes trophiques et au maintien d'une biodiversité fonctionnelle* contribuant à la régulation des ravageurs (Simon et al. 2015), l'usage des pesticides affecte négativement cette biodiversité (Biddinger and Hull 1995; Biddinger et al. 2013; Cumming and Spiesman 2006; Flexner et al. 1986; Pekár 1999). Outre les enjeux environnementaux, plusieurs études ont montré que les producteurs et salariés de l'exploitation sont directement exposés aux risques sanitaires des produits chimiques appliqués ; les consommateurs pourraient l'être également par la présence de résidus de produits chimiques dans les fruits (ANSES 2015; EFSA 2015).

D'autre part, les exigences des consommateurs et des circuits de distribution en termes de qualité gustative, d'aspect visuel et d'état sanitaire des fruits frais, réduisent les marges de manœuvre pour diminuer les traitements phytosanitaires. Par conséquent, la filière doit relever un double défi : assurer une productivité compétitive face aux flux du marché tout en respectant l'environnement et la santé humaine.

Pour tenter de répondre à ce défi, de nouveaux modes de production se sont développés dans la filière, notamment la production fruitière intégrée (PFI). La PFI est définie par l'OILB / SROP (1997) comme un « système de production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation de produit agrochimiques, afin d'améliorer la protection de l'environnement et de la santé humaine ». Le guide Ecophyto pour les productions fruitières (Laget et al. 2015) propose une méthode de conception de systèmes de culture visant à réduire l'usage des produits phytopharmaceutiques grâce à la mobilisation de différents leviers d'action, comme des méthodes alternatives à la lutte chimique.

Dans ce guide, les leviers sont regroupés en six catégories : le contrôle génétique*, le contrôle cultural*, la lutte physique*, la lutte biologique*, la lutte biotechnique* et les produits peu préoccupants pour l'environnement et la santé.

Le service de régulation des bioagresseurs est un des services étudiés dans le cadre de ce travail de thèse. A l'heure actuelle, il n'existe pas vraiment d'outils et/ou de modèles simples à mettre en œuvre pour quantifier ce service au sein des agroécosystèmes. Pour contourner cette difficulté, nous avons considéré que l'estimation des dégâts occasionnés par les bioagresseurs au pommier, combinée à une réduction d'usage des pesticides par l'emploi des méthodes citées ci-dessus, pouvait être le reflet du service de régulation fourni par un agroécosystème sous l'influence des pratiques culturales. Nous nous sommes intéressés aux trois bioagresseurs principaux du pommier : le carpocapse (*Cydia pomonella*), le puceron cendré (*Dysaphis plantaginae*) et la tavelure (*Venturia inaequalis*). Les dégâts sont des symptômes visuels sur les plantes, causés directement par l'attaque d'un bioagresseur – piqûre de fruit pour le carpocapse, taches sur les feuilles ou les fruits pour la tavelure – et/ou consécutifs à cette attaque – dessèchement de rameaux après attaque du puceron - s'accompagnant ou non d'une réduction de croissance du végétal (Laget et al. 2015).

Pour estimer ces dégâts, nous avons utilisé le cadre de modélisation IPSIM (Injury Profile SIMulator (simulateur de profil de dégâts)) (Aubertot and Robin 2013). IPSIM nous a permis de considérer de manière intégrative les impacts de l'ensemble des opérations de protection du verger ainsi que des conditions du milieu sur les dégâts causés par les bioagresseurs sur les pommiers. Le modèle IPSIM-Pommier a été conçu à l'aide d'une étude bibliographique approfondie et de dires d'experts du sud-est de la France. Il a été évalué à partir de données récoltées dans le cadre du travail de thèse en 2014 et 2015 sur deux dispositifs expérimentaux de vergers de pommiers. Ces deux dispositifs, qui comportent différents modes de culture et sont situés dans le sud-est de la France, sont localisés à la station expérimentale 'La Pugère' à Mallemort et à l'INRA de Gothenon (dispositif Bioreco) (Chapitre 2). Dans ce chapitre, nous détaillons dans un premier temps les différentes étapes suivies et les outils de travail utilisés pour la conception et l'évaluation du modèle. Puis, nous présentons la structure finale du modèle et son évaluation basée sur les données des deux dispositifs expérimentaux étudiés.

2. Matériels et méthodes

2.1. Description des trois bioagresseurs étudiés

2.1.1. Carpocapse

Le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*; Lepidoptera : Tortricidae) est un insecte dont la larve se développe à l'intérieur des fruits et cause des dommages importants dans les vergers de pommiers (Fig. 4.1). Les pommes attaquées se reconnaissent au trou dont la bordure est rongée, la larve creusant une galerie en spirale. Son point de pénétration se situe souvent au contact de deux fruits. Elle se dirige ensuite à l'aide d'une galerie linéaire vers le cœur du fruit et s'attaque aux pépins provoquant fréquemment la chute du fruit. Les adultes de la première génération (G1) apparaissent entre fin avril et fin mai, et les générations peuvent être renouvelées jusqu'à trois fois en climat méditerranéen. Les femelles pondent sur les feuilles, les tiges ou l'œil des fleurs fécondées (Beers et al. 2003). La larve se développe dans les fruits pendant environ 20 à 30 jours puis elle en sort et forme un cocon blanchâtre dans les anfractuosités du tronc. Par la suite, soit elle se nymphose et forme un papillon de deuxième génération, soit elle passe l'hiver en diapause et forme une chrysalide au printemps (Balachowsky 1996).

2.1.2. Puceron cendré

Le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* ; Homoptera : Aphididae) est comme les autres pucerons un insecte qui se nourrit exclusivement de la sève des plantes, grâce à son système buccal de type piqueur-suceur. Ce mode de nutrition affaiblit l'hôte par le prélèvement de sève, dessèche les pousses qui ont été infestées ou provoque des malformations de celles-ci (Forrest and Dixon 1975). De l'œuf pondu en hiver sur l'hôte primaire émerge au printemps la fondatrice qui engendre par parthénogénèse plusieurs générations de virginipares aptères. En fin de printemps apparaissent les individus ailés qui vont assurer la migration vers l'hôte secondaire, souvent une plante herbacée. Les fourmis se nourrissent du miellat produit par les pucerons et en contrepartie les protègent contre leurs ennemis (Ricard et al. 2012) (Fig. 4.2).



Figure 4.1: Carpocapse sur rameaux de pommier sur le site de la Pugère



Figure 4.2: Infestation de pucerons cendré et présence de fourmis sur jeunes pousses de pommier sur le site expérimental de Gothéron, mai 2015.

2.1.3. Tavelure

Le responsable de la tavelure du pommier est *Venturia inaequalis*, un agent pathogène de la famille des ascomycètes. La tavelure attaque les feuilles et les fruits durant quasiment toute la saison. Les

symptômes sont d’abord visibles sur la face inférieure des feuilles, puis sur toute la feuille (taches « d’huile » jaunes ou brunes ; Fig. 4.3) et éventuellement sur le fruit. Des contaminations importantes provoquent notamment de fortes pertes de feuilles, avec un impact sur la formation de bourgeons floraux. Les organes de fructification du champignon (pseudothèces), sont constitués de 8 ascospores. Pendant la phase de contamination primaire, elles adhèrent à la surface sèche ou mouillée des tissus végétaux vivants avec lesquels elles entrent en contact et germent rapidement en présence d’eau, permettant ainsi la croissance du mycélium en surface (MacHardy 1996; Agrios 2012). La contamination dite secondaire est due au développement des conidies (une autre forme de structure reproductrice) dans les lésions provoquées par la première contamination et dont le cycle est réitéré plusieurs fois jusqu’à la récolte. En hiver, en particulier sur la face supérieure des feuilles restant au sol, *Venturia inaequalis* résiste sous forme de pseudothèces immatures (Grove et al. 2003).



Figure 4.3: Lésions sur feuille dues à la contamination par la tavelure sur le site de Gotheron, 2015

2.2. Principes généraux d’IPSIM

IPSIM est défini comme un cadre de modélisation permettant de prédire des profils de dégâts de bioagresseurs en fonction de pratiques culturales et d’éléments biotiques et abiotiques de l’environnement. Ce cadre s’inspire du modèle Masc (Craheix et al. 2012) basé sur la décomposition

d'un ensemble complexe de décisions en ensembles plus petits et moins complexes. DEXi est la structure sur laquelle repose IPSIM. C'est à la base un logiciel informatique pour le développement de modèles d'aide à la décision multicritère (Bohanec 2008). L'organisation de DEXi permet de développer des modèles qualitatifs permettant d'évaluer en regard de critères de sortie un ensemble défini par de multiples facteurs, comme ceux qui décrivent un itinéraire technique ou un système de culture combiné à des conditions de milieu. Avec IPSIM, DEXi est utilisé pour la première fois dans le but de développer un modèle de simulation. Les facteurs impactant les profils de dégâts γ sont désagrégés en sous-facteurs et hiérarchiquement structurés dans un arbre de décision. Ils sont renseignés par un recueil d'information établi à partir d'une étude bibliographique et de dires d'experts relatifs à un contexte donné.

2.3. Structure du modèle

La structure du modèle (Fig. 4.4) repose sur trois onglets, dans lesquels sont liés différents types d'entités. Le premier onglet décrit l'arbre de décision. Pour chacun des trois bioagresseurs, l'arbre de décision est décrit par la combinaison de deux principaux facteurs influençant le niveau des dégâts:

- (i) les pratiques culturales : incluant le choix de la variété, son mode de conduite et la protection phytosanitaire des vergers
- (ii) les conditions du milieu : intégrant aussi bien les conditions climatiques que la présence d'infrastructures agroécologiques (ex : des haies, des mares, des nichoirs) et d'auxiliaires.

Ces facteurs sont nommés « attributs » dans la plateforme IPSIM, et décomposés en sous-attributs, eux-mêmes décomposés en attributs de base, qui sont aussi les variables d'entrée du modèle. Ces attributs sont décrits dans une structure en arborescence. Les attributs sont l'unité de base d'une agrégation, ou encore nœud interne. Ils sont décrits de manière qualitative (variables nominales ou ordinales) par des échelles. Les attributs sont associés entre eux par des fonctions d'agrégation. Grâce à un système de pondération des attributs au sein des fonctions d'agrégation, l'arbre de décision permet de donner différentes priorités aux attributs impactant les dégâts d'un bioagresseur. Les utilisateurs peuvent ainsi tester plusieurs choix et en débattre en toute transparence, puisque le poids donné aux différents critères choisis est apparent. On appelle table d'agrégation un ensemble cohérent de fonctions d'agrégation (par exemple un ensemble relatif à la protection phytosanitaire contre le carpocapse). Le Tableau 4.1 définit de façon détaillée et par des exemples, la signification de chacune de ces entités.

Le deuxième onglet (Fig. 4.4) décrit les nœuds terminaux de l'arbre de décision, qui sont les variables d'entrée. Ces variables doivent être précisées par l'utilisateur et définissent les « systèmes » étudiés, qui comprennent un itinéraire technique, un climat, des infrastructures agroécologiques, etc.

Le troisième onglet (Fig. 4.4) décrit les nœuds-racines qui sont les valeurs simulées par le modèle, c'est-à-dire les profils des dégâts de chaque bioagresseur pour chaque système étudié.

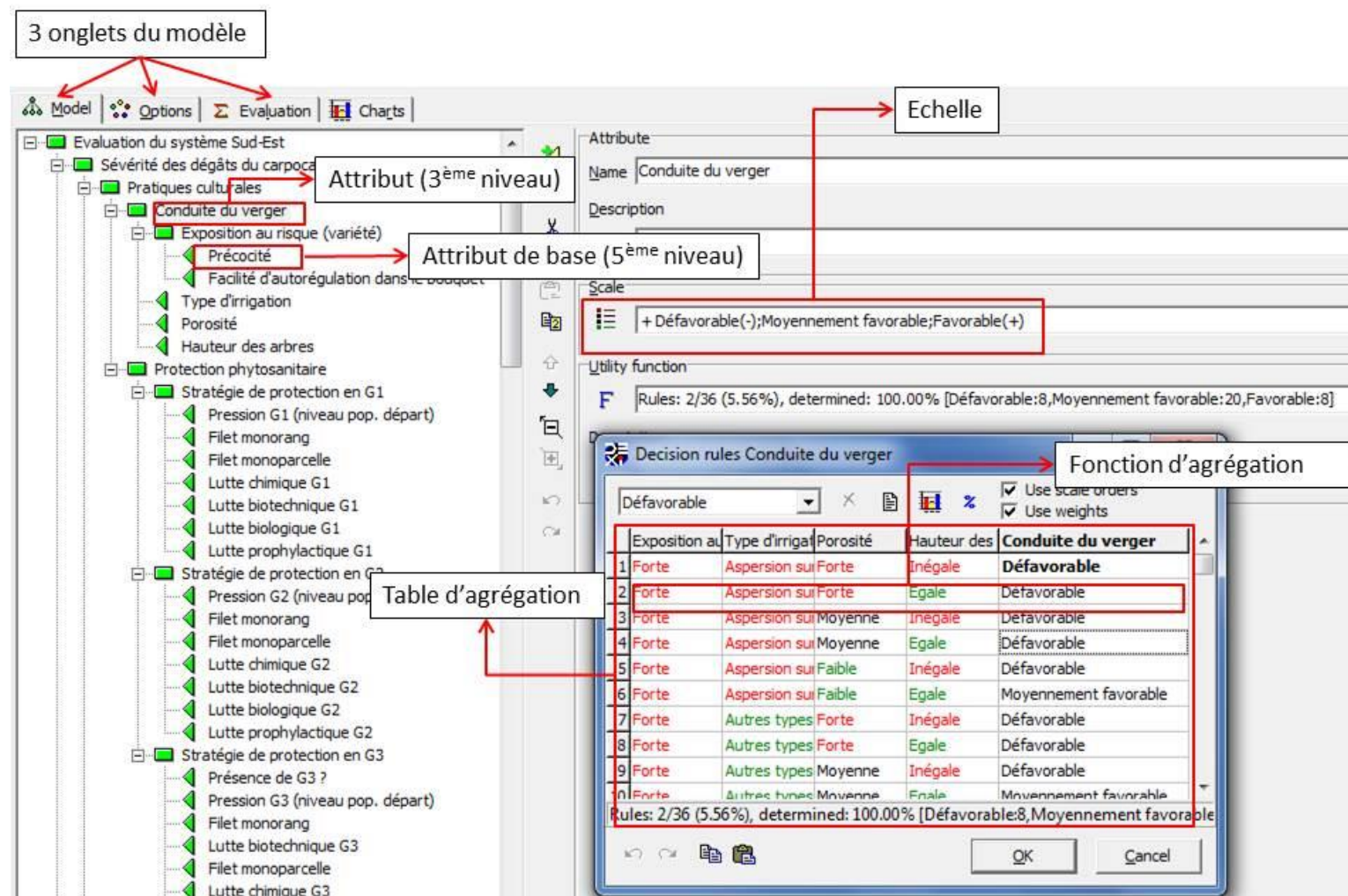


Figure 4.4: Schéma explicatif des principales entités de IPSIM sur l'exemple de IPSIM-Pommier. Les trois onglets apparaissent en haut à gauche. L'interface présentée ici permet de visualiser les entités de l'onglet n°1. On retrouve les exemples du tableau 4.1 pour l'attribut 'Conduite du verger'. Les interfaces des onglets 2 et 3 ne sont pas présentées. Les termes illustrant l'échelle se rapportent au contrôle des bioagresseurs (i.e. favorable signifie meilleur contrôle, c'est-à-dire réduction des dégâts)

Tableau 4.1 : Principales entités organisationnelles du logiciel DEXI

Variables	Explications	Exemple sur conduite du verger
les attributs	variables qualitatives de décision qui représentent les sous-problèmes à résoudre. Le nombre de niveaux d'attributs est illimité.	<i>sévérité des dégâts du carpocapse</i> (1 ^{er} niveau) <i>effet des pratiques culturales</i> (2 ^{ème} niveau) <i>conduite du verger</i> (3 ^{ème} niveau) <i>exposition au risque (ex tavelure) de la variété</i> (4 ^{ème} niveau) <i>variété précoce</i> (5 ^{ème} niveau)
les échelles	ensembles ordonnés de valeurs attribuées aux attributs (le plus souvent qualitatives). L'ordonnement se fait selon que l'effet sur le contrôle des bioagresseurs est positif, négatif ou neutre.	<i>conduite du verger</i> → [défavorable (-) ⁴ , moyennement favorable (x), favorable (+)] <i>exposition au risque de la variété</i> → forte (-), Assez forte (x), faible (+) <i>précocité</i> → [non (x), oui (+)]
les fonctions d'agrégation	règles qui définissent l'agrégation des attributs. Ces règles sont définies à partir d'un système de pondération.	Règles définissant l'attribut « conduite du verger » selon 4 sous-attributs pondérés : l'exposition au risque (49%), le type d'irrigation (16%), la porosité (aération du verger) (18%), la hauteur des arbres (16%).
les tables d'agrégation	ensemble cohérent regroupant plusieurs fonctions d'agrégation	Fonctions d'agrégation définissant l'ensemble des leviers utilisés pour la protection contre le carpocapse

Dans le modèle IPSIM-Pommier, 124 attributs de base ont été définis pour créer l'arbre de décision. Ces attributs de base sont agrégés en 41 nœuds. Nous arrivons ensuite, nœud par nœud, à une estimation qualitative de la sévérité du dégât sur l'ensemble 'système x bioagresseur' étudié.

⁴ Ces termes se rapportent au contrôle des bioagresseurs (i.e. favorable signifie meilleur contrôle, c'est-à-dire réduction des dégâts).

2.4. Démarche générale de conception et d'évaluation du modèle

La conception et l'évaluation du modèle IPSIM-Pommier ont été réalisées en trois grandes étapes (Fig. 4.5).

Une première étape a consisté à recueillir les informations nécessaires pour les transcrire dans l'arbre de décision du modèle. Cette étape s'est faite avec plusieurs itérations : réalisation d'une importante étude bibliographique, entretiens individuels avec huit experts présentant des domaines de compétences différents, entretiens collectifs. L'expertise des personnes interrogées englobait un large champ de connaissances dans le sud-est de la France : aussi bien sur le comportement de chacun des bioagresseurs, que sur le choix des pratiques et sur la biodiversité fonctionnelle* des vergers de pommiers.

La deuxième étape a consisté à saisir les variables d'entrée dans le modèle à partir des données recueillies sur les dispositifs expérimentaux de la Pugère et de Gotheron pour les années 2014 et 2015, puis à simuler la sévérité des dégâts des bioagresseurs sur ces bases. Cette sévérité se décline en plusieurs valeurs ordinales : « faible », « moyenne », « forte » et « très forte ». Les dégâts du carpocapse et de la tavelure ont été considérés sur la pomme à la récolte, alors que ceux du puceron ont été considérés sur les rameaux vers la mi-mai, juste avant la migration des pucerons vers un hôte secondaire. Les experts ont également été sollicités pour cette étape, cette fois comme utilisateurs potentiels du modèle. Cela a permis de considérer la difficulté pour l'utilisateur à transcrire la réalité du terrain en variables d'entrée du modèle. Nous avons ainsi procédé à de nouvelles modifications de la structure de l'arbre de décision, donc à un retour sur la première étape.

La troisième et dernière étape a consisté à confronter les valeurs simulées par IPSIM-Pommier aux valeurs observées sur les deux dispositifs expérimentaux, à savoir les comptages de fruits piqués et tavelés à la récolte et le nombre de rameaux infestés juste avant la migration des pucerons vers un hôte secondaire. Ceci nous a permis d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle. En revanche nous n'avons pas pu procéder à une évaluation de la qualité prédictive du modèle, qui aurait nécessité des données indépendantes, ou une quantité suffisante de données pour une validation croisée (Wallach et al. 2001).

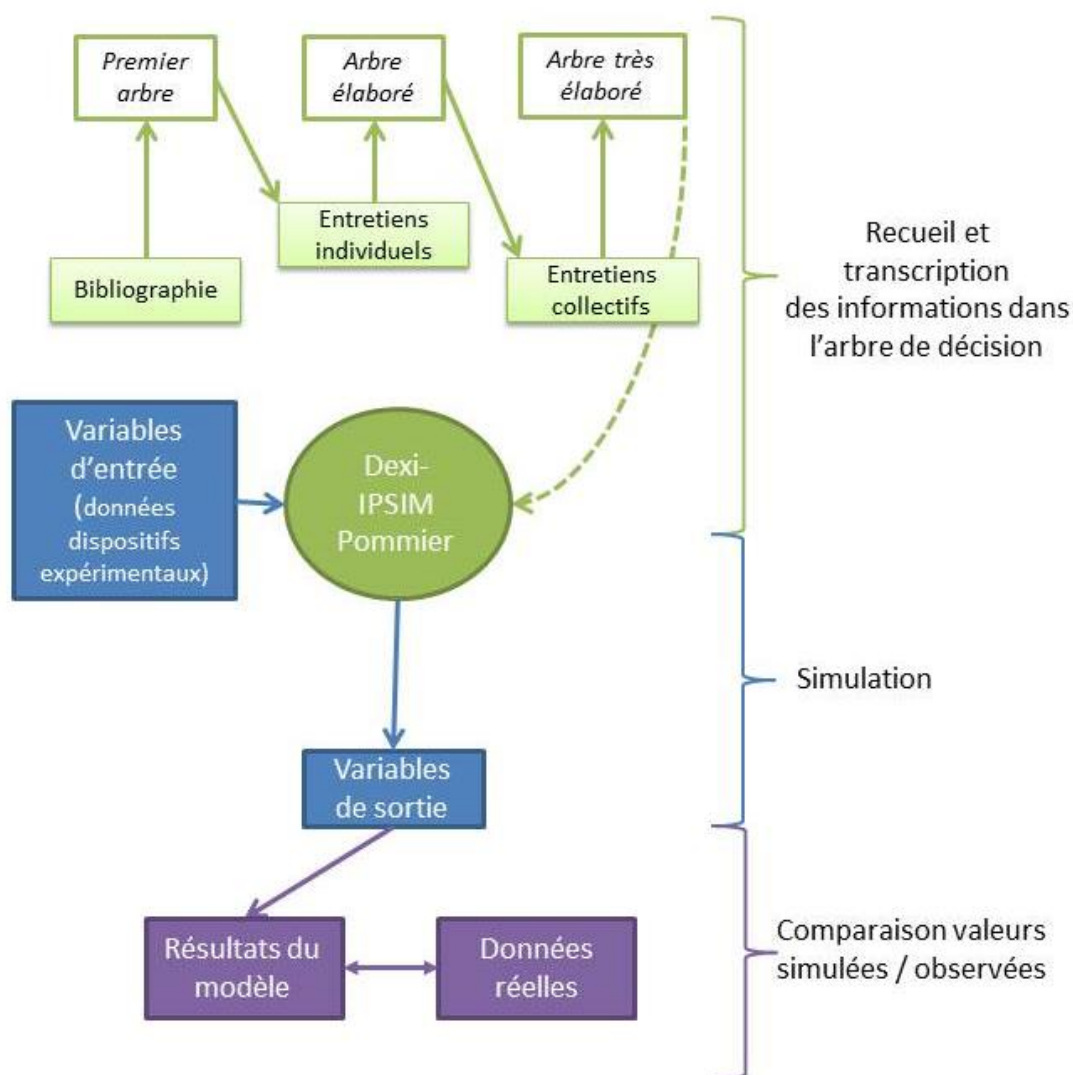


Figure 4.5 : Diagramme méthodologique de la conception et de l'évaluation de la qualité d'ajustement d'IPSIM-Pommier. L'arbre de décision est dans un premier temps décrit par une étude bibliographique puis ajusté par des dires d'experts. Ces données sont transcrites dans le logiciel DEXI. Puis des simulations sont lancées sur la base des itinéraires techniques et conditions des deux dispositifs expérimentaux en 2014 et 2015. Enfin les résultats du modèle sont comparés aux observations de dégâts, à la récolte pour le carpocapse et la tavelure et au pic de vol mi-mai du puceron cendré.

L'effet des pratiques culturales et des conditions du milieu sur les dégâts des bioagresseurs reprend la démarche générale d'analyse des services écosystémiques utilisée dans cette thèse (Fig. 4.6). Nous avons utilisé la sévérité des dégâts des bioagresseurs comme un indicateur de fonction écosystémique, décrivant une perte de fruits ou de feuilles selon le bioagresseur considéré. Ces valeurs qualitatives sont transformées en valeurs quantitatives et sont soit introduites dans le modèle STICS via un effeuillage dans le cas des rameaux infestés par le puceron (correspondant au pic de vol des pucerons vers la mi-mai), soit liées aux sorties du modèle STICS par une diminution de rendement liée aux pertes de fruits (induites par le carpocapse et la tavelure). Ce couplage des sorties du modèle IPSIM-Pommier avec le modèle STICS est détaillée dans le chapitre 5.

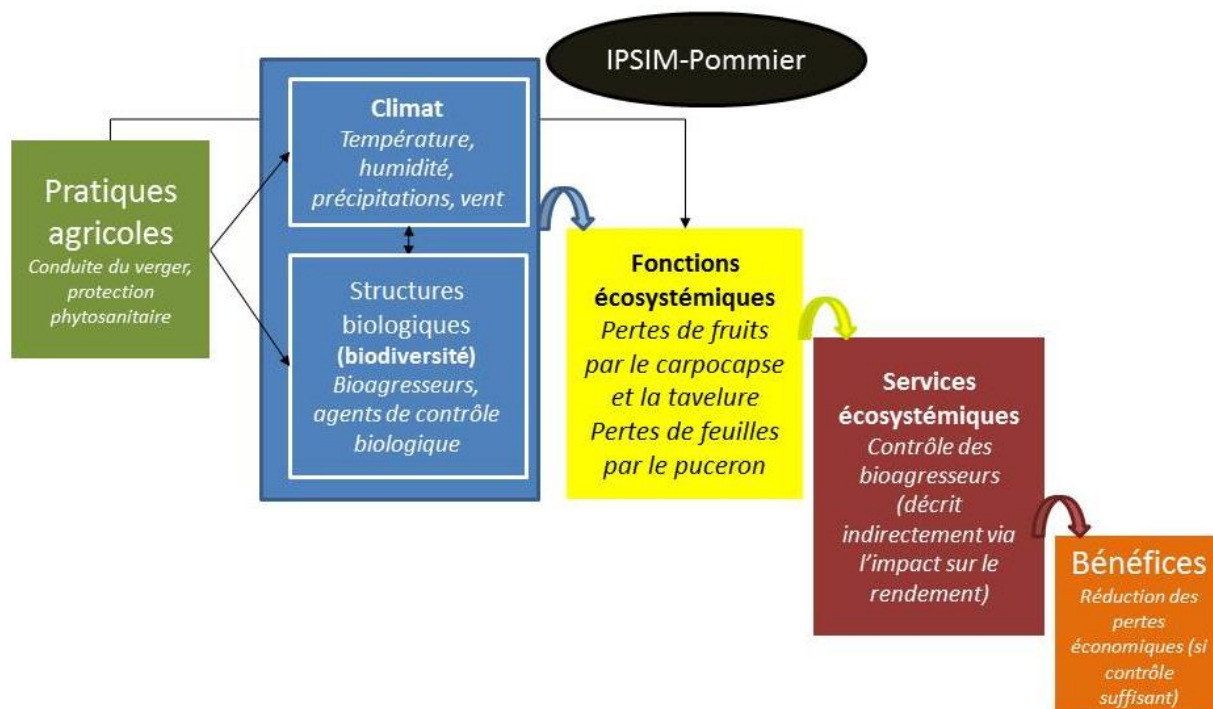


Figure 4.6: Démarche d'analyse du service écosystémique de régulation des bioagresseurs au sein d'un verger de pommier (adapté de Haines-Young & Potschin, 2009). Chaque entité décrit le cas particulier du service de contrôle des bioagresseurs.

2.5. Conception détaillée du modèle

2.5.1. Création de l'arbre de décision

La création d'un arbre de décision transposable dans le logiciel DEXI demande une analyse conjointe entre d'une part les informations recueillies dans la littérature et auprès des experts, et d'autre part la conception du modèle dans le logiciel DEXI utilisant un langage informatique particulier (Fig.4.7).

Une première étude bibliographique sur les facteurs influençant les dégâts des trois bioagresseurs étudiés a permis de choisir les principales pratiques culturales et les conditions de milieu ayant un impact sur ces dégâts dans un verger de pommier. Ce travail a été enrichi par les dires d'experts. Les entretiens réalisés ont été semi-directifs et ont suivi une liste de questions ciblant les informations dont nous avons besoin pour étayer les données bibliographiques. Les entretiens individuels ont cependant mis en évidence des désaccords entre les avis d'experts. Nous avons donc continué d'ajuster le recueil d'informations en organisant un séminaire regroupant l'ensemble des experts. L'exercice a permis d'harmoniser les résultats.

Pour faciliter l'analyse conjointe entre les données d'experts et de la bibliographie et la conception de l'arbre de décision, les informations recueillies ont été structurées sous forme de tableaux de

données, synthétisant les impacts de pratiques culturelles et de conditions du milieu sur les dégâts des bioagresseurs. L'organisation de ces tableaux est proche de celle de l'arbre de décision d'IPSIM, allant des facteurs principaux impactant le bioagresseur à la déclinaison précise de plusieurs pratiques culturelles. A partir de l'étude bibliographique, un premier tableau a été réalisé pour chaque bioagresseur, comportant une liste la plus exhaustive possible des facteurs avec un impact potentiel sur les dégâts du bioagresseur. Puis, ce tableau a été rendu plus concis en ne gardant que les facteurs ayant un impact important sur les dégâts selon la convergence des avis d'experts. Ces tableaux sont disponibles en Annexes 4.A, 4.B et 4.C et se composent :

- de l'effet des facteurs sur les dégâts d'un bioagresseur : il peut y avoir un effet positif sur les dégâts causés par le bioagresseur (+) (c'est-à-dire un effet positif sur le développement du bioagresseur), un effet négatif (-) ou pas d'effet (x).
- de l'intensité des effets des facteurs sur les dégâts selon une échelle allant de 0 à 3 (3 étant la plus forte).
- de la convergence des avis pour gérer les contradictions entre les différentes sources d'information : nous avons pris en compte la convergence d'avis, c'est-à-dire le nombre de fois où chacun des experts et la bibliographie ont donné des réponses allant dans le même sens, divisé par le nombre d'avis total. Le poids d'un avis pour un facteur donné est obtenu en multipliant le nombre d'avis recueillis pour ce facteur par le pourcentage de convergence (Annexes 4.A, 4.B et 4.C).

Ces tableaux ont alors été intégrés dans le logiciel DEXI, en mettant en commun d'une part les données recueillies et d'autre part les étapes de conception de l'arbre de décision (Tab. 4.2).

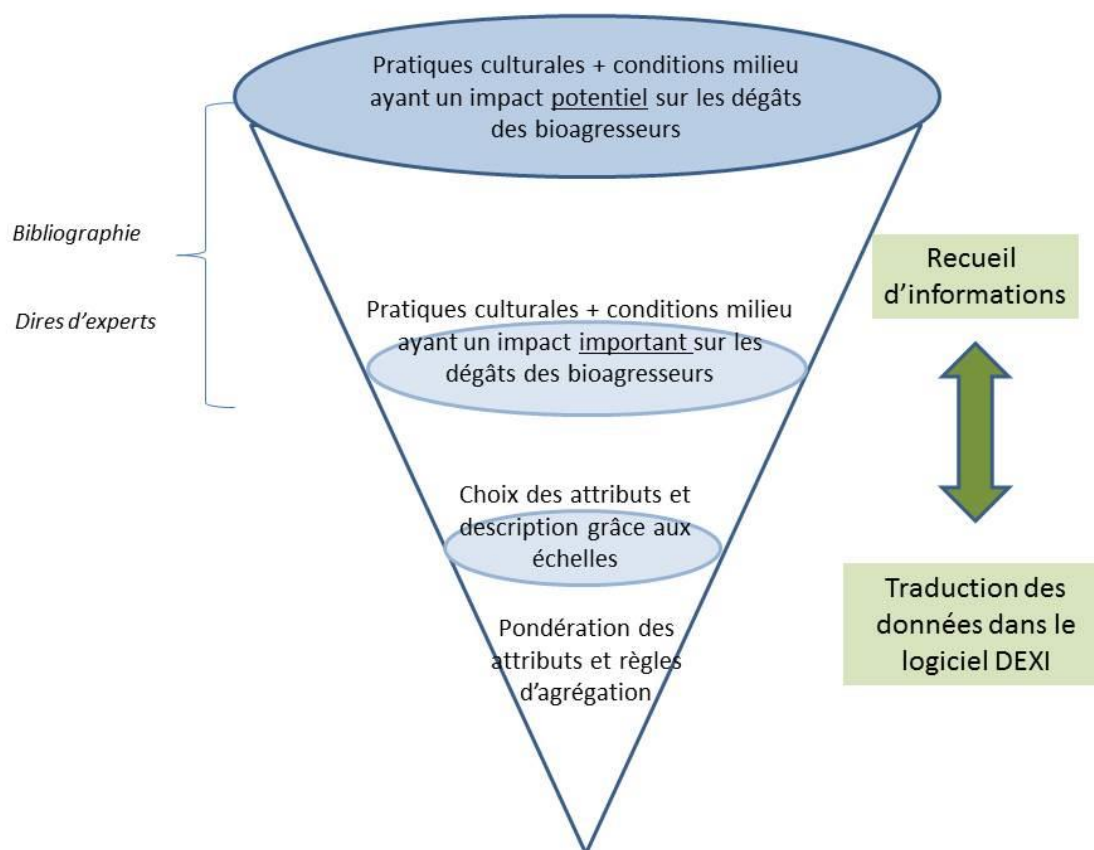


Figure 4.7 : Schéma de la démarche suivie pour la conception de l'arbre décisionnel décrivant les impacts des pratiques culturelles et des conditions du milieu sur les dégâts de chaque bioagresseur sous IPSIM.

Tableau 4.2 : Liens entre le recueil d'information et la conception de l'arbre de décision.

Informations recueillies	Conception de l'arbre de décision
Les facteurs impactant les dégâts des bioagresseurs	Les attributs et sous attributs
L'effet de ces facteurs sur les dégâts des bioagresseurs	les échelles décrivant les attributs
L'intensité de l'effet des facteurs et la convergence des avis	l'agrégation des attributs via des fonctions d'agrégation

2.5.2. Le choix des attributs et leur emplacement dans l'arbre de décision

L'arbre de décision a été plusieurs fois remodelé pour se rapprocher au mieux de la réalité du terrain. Ne pouvant pas expliquer le choix de chaque attribut, nous illustrons le passage du tableau de recueil de données aux attributs d'IPSIM-Pommier, par deux exemples : (i) la prise en compte d'une échelle temporelle dans les pratiques de protection phytosanitaire contre le carpocapse et (ii) la prise en

compte conjointe de leviers d'action et de la pression de chaque bioagresseur pour la protection phytosanitaire.

Cas 1 : prise en compte des générations du carpocapse

Pour le carpocapse (Fig. 4.8), nous avons répété des bouts d'arbre pour intégrer les différentes générations du carpocapse et les sous-attributs jouant un rôle clé sur le développement de chacune d'elles. Nous avons ainsi créé trois sous-arbres en donnant des pondérations différentes pour la génération 1 d'avril-mai (G1), la génération 2 de juin-juillet (G2) et la génération 3 d'août (G3). D'après les experts, la deuxième génération de carpocapse dans le sud-est cause le plus de dégâts. La première génération est la population créant la G2, mais cette dernière peut aussi venir d'un mouvement inter-parcellaire. La G3 n'a pas forcément lieu dans le sud-est. Elle n'est donc pas assez importante pour créer une forte sévérité de dégâts, mais nous l'avons cependant prise en compte dans le modèle, avec un poids moins fort.

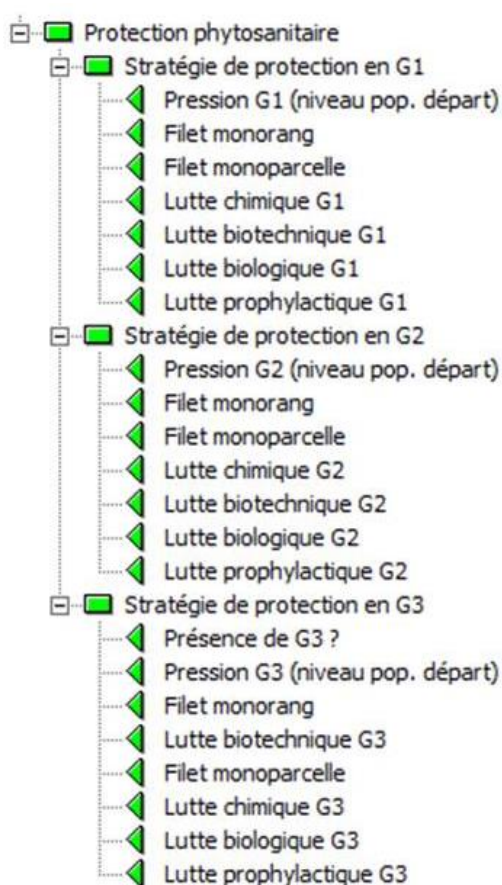


Figure 4.8: Sous-arbre de décision de la protection phytosanitaire contre le carpocapse.

Cas 2 : choix des attributs pour la protection phytosanitaire

La décomposition en différents sous-attributs est fonction des leviers d'action disponibles actuellement pour contrôler directement chaque bioagresseur. Pour le carpocapse, le nombre de leviers d'action est le plus élevé : lutttes biotechnique, physique, chimique, biologique et prophylactique (Fig. 4.8). Pour le puceron cendré (Fig. 4.9A) nous avons différencié les traitements « pré-floraux » des traitements « post-floraux », ainsi que les pesticides de synthèse des huiles et argiles. Pour la tavelure (Fig. 4.9B), d'après les experts, les agriculteurs utilisent en priorité un fongicide préventif à chaque risque moyen ou grave annoncé par les avertissements agricoles, afin d'empêcher le champignon de contaminer la parcelle. Dans le cas de risque grave il est souvent recommandé des traitements curatifs en complément des traitements préventifs.

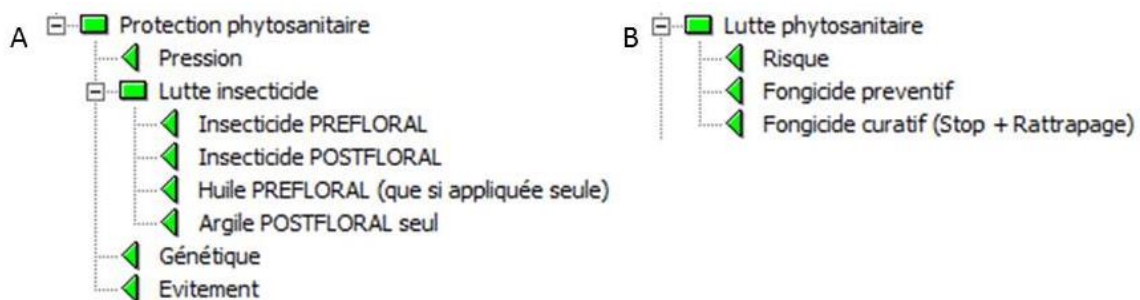


Figure 4.9: Sous-arbre de décision de la protection phytosanitaire contre le puceron cendré (A) et la tavelure (B).

Un autre sous-attribut considéré dans la protection phytosanitaire est la pression ou le risque de contamination d'un bioagresseur (Figs. 4.8 et 4.9). En effet, le choix de leviers d'action en est très fortement dépendant pour la protection phytosanitaire. Cette pression ou risque de contamination est apprécié(e) différemment pour chaque bioagresseur :

- pour le carpocapse, les indicateurs habituels sont le nombre de piqûres observées sur les fruits ou le nombre de larves récupérées sur des bandes pièges. Pour la protection, les producteurs se basent sur le lien logique entre générations, entre années ou d'une année à l'autre : observations de l'année n-1 pour la protection contre la G1 de l'année n, et de même avec G1 pour G2, G2 pour G3.
- pour le puceron cendré : la pression au cours de la saison est mesurée par un pourcentage de rameaux infestés.
- pour la tavelure : le risque est d'autant plus fort que la parcelle présente une topographie à risque (retenant l'humidité), qu'elle est trop arrosée ou pendant trop longtemps dans la journée, que les

températures sont favorables selon la courbe de Mills, et enfin que la présence de tavelure sur la parcelle a déjà été observée l'année d'avant.

2.5.3. Le choix des échelles

Les échelles peuvent être décrites par des valeurs d'état (oui/non) ou des valeurs ordinales (défavorable, moyennement favorable, favorable), parfois aussi par des intervalles (notamment pour l'effet des températures). Ces échelles ont à un impact positif, négatif ou neutre sur le contrôle des bioagresseurs, ce qui est décrit par une couleur attribuée à chaque échelle dans le modèle (Fig. 4.10). Par exemple la confusion sexuelle, une échelle possible de l'attribut « Lutte biotechnique », a un impact positif sur le contrôle du carpocapse (ou un impact négatif sur ses dégâts). Le choix des échelles a été réalisé de manière à ce que l'agrégation des attributs soit logique et simple à créer, en évitant la multiplication des lignes de fonctions d'agrégation. Pour ne pas alourdir les tables d'agrégation, nous avons choisi de nous restreindre à un nombre d'échelles qualitatives faible. Par exemple, pour décrire l'attribut d'exposition au risque, nous avons choisi trois échelles qualitatives : « Forte », « Assez forte » et « Faible ». Pour illustrer les choix d'échelles, nous décrivons deux cas.

Cas 1 : Le risque associé à la facilité d'autorégulation dans le bouquet floral

Le risque associé à la facilité d'autorégulation dans le bouquet est un sous-attribut de l'exposition au risque de tavelure et dans une moindre mesure du carpocapse. Les fruits qui se touchent sur un pommier ont plus de chance d'être contaminés ou piqués. Ce risque associé à la facilité d'autorégulation est décrit par le nombre de fruits par bouquet, qui dépend de la variété. Il a été décrit par des échelles ordinales dans le modèle, avec une correspondance directe au choix variétal : faible risque - 1 fruit par bouquet (variétés Galinette, Choupette, ...), risque assez fort - 1 à 2 fruit(s) par bouquet (variété Granny, ...), risque fort - entre 2 et 4 fruits (variétés Gala, Breber, Nestar,...).

Cas 2 : Sévérité des dégâts

La sévérité des dégâts se décline en « très forte », « forte », « assez forte » et « faible ». Chacune de ces échelles qualitatives peut être décrite quantitativement par l'utilisateur mais de façon variable selon le système de culture. Cela donne notamment la possibilité de comparer des valeurs simulées à des valeurs observées (voir Section 3.2).

2.5.4. Règles de décision pour l'agrégation des attributs

Le choix des règles de décision pour l'agrégation des attributs, centré sur un système de pondération des attributs (ici avec des poids donnés en pourcentage), est au cœur d'IPSIM. Pour l'illustrer, nous avons choisi de décrire le cas du carpocapse.

On peut faire varier les poids des sous-attributs au niveau du nœud constituant l'attribut des pratiques culturales (ex de la G2 du carpocapse ; Fig. 4.10). Pour l'impact de la conduite du verger et de l'effet variétal sur la sévérité de dégâts du carpocapse, on a choisi une part de 50% accordée à l'exposition au risque lié au choix variétal (c'est-à-dire à la précocité de la variété et à la facilité d'autorégulation du bouquet), 16% pour l'irrigation, 18% pour la porosité du feuillage et 16% pour la hauteur des arbres.

Le poids attribué à chaque méthode de protection a été décidé après harmonisation des dires d'experts : pour la protection en G2, le poids de la pression G2 est de 12%, celui des filets monoparcelle (Fig. 4.11) et monorang (barrière physique) est de 22% chacun, celui de la lutte chimique de 19%, celui de la lutte biotechnique* (confusion sexuelle) de 19%, celui de la lutte biologique * (virus de la granulose) de 9% et celui de la prophylaxie (éclaircissage manuel) de 1%. A partir de cette pondération, une table d'agrégation a été créée pour déterminer l'effet de l'ensemble des moyens de lutte, associés à la pression en G2, sur l'effet de la stratégie de protection en G2 sur le contrôle du carpocapse (ici décrit par les échelles « Favorable », «Défavorable », « Moyennement favorable », les effets sur les dégâts étant par définition opposés) (Fig.4.8).

.



Figure 4.11: Filet Alt'Carpo monoparcellaire sur le site expérimental de La Pugère, système bas-intrants.

2.5.5. Interactions entre les choix d'attributs, leurs échelles et leurs agrégations

Nous avons illustré l'importance de la place des attributs les uns par rapport aux autres, des échelles les décrivant et enfin des pondérations utilisées pour agréger ces attributs. Un exemple un peu particulier illustrant bien le lien nécessaire entre ces trois entités est le cas de la gestion des facteurs climatiques.

Les optimums climatiques sont très différents d'un bioagresseur à l'autre. Le carpocapse présente différents stades de croissance (œuf, larve, imago) ; il faut donc prendre en compte aussi bien sa résistance au vent pendant son envol que la chute des œufs pondus sous les feuilles en cas de fortes pluies. Les différentes populations de puceron cendré se déplacent fréquemment et peuvent, en cas de vent, être entraînées en dehors ou à l'intérieur de la parcelle d'étude. A cause du manque de connaissances précises sur ses effets, le vent n'a pas été pris en compte dans le cas du puceron (Annexe 4.B). Par ailleurs, en intégrant les facteurs climatiques dans le modèle, nous nous sommes aperçus de la difficulté à les pondérer en fonction des saisons. Il a donc fallu agréger certains attributs entre eux comme des sous-arbres (ex : pluviométrie et température) pour mieux prendre en compte les effets des saisons sur le puceron par exemple (Fig. 4.12). Pour les experts, la

pondération pour le printemps est plus basse que les autres. En effet, à cette période de l'année, ce sont davantage la croissance et la vigueur de l'arbre qui impactent les dégâts du puceron cendré que les conditions climatiques subies par l'insecte. La pondération a donc été réalisée comme suit : 30% pour l'automne de l'année n-1, 30% pour l'hiver de l'année n-1, 10% pour le printemps de l'année n et 30% pour l'été de l'année n.

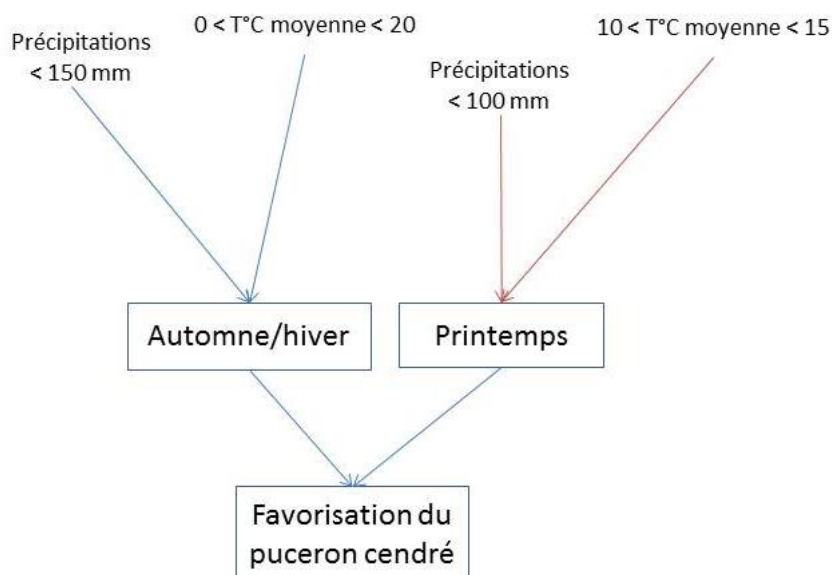


Figure 4.12: Facteurs climatiques favorisant le puceron cendré. Les sous-attributs sont encadrés et les échelles des attributs se trouvent en haut du schéma.

La tavelure est un champignon qui répond simultanément à la température et à la durée d'humectation. Pour définir les conditions de favorisation de ce bioagresseur, on utilise généralement un modèle qui intègre la pluie, la durée d'humectation et la température (courbe de Mills, Mills and LaPlante (1951)). Ces conditions sont résumées dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Principales conditions de favorisation de la tavelure, en termes de durée d'humectation et de température

Pluie	Temps d'humectation	Gammes de température	
Non → Pas de risque			
	< 10h → Pas de risque		
	10h < h < 15h	5 à 10 °C	Pas de risque
Oui		10 à 25 °C	Léger risque
	15h < h < 20h	5 à 10 °C	Pas de risque
		10 à 25 °C	Risque assez fort
	> 20h	5 à 10 °C	Pas de risque
		10 à 25 °C	Risque fort

Dans IPSIM-Pommier, c'est un risque moyen sur la saison qui est apprécié. En effet, il n'était pas possible de réitérer l'attribut « protection phytosanitaire » (Fig. 4.9B) autant de fois qu'il y avait un risque d'apparition de la tavelure. Par ailleurs, pour augmenter le grain de précision sur le risque lié à la tavelure, nous avons créé deux sous-attributs permettant de renseigner qualitativement le nombre de contamination au printemps, ainsi que la fréquence de contamination.

2.6. Evaluation des systèmes pour le contrôle global des bioagresseurs

Dans le sud-est de la France, les experts considèrent que les dégâts occasionnés sur le pommier par les trois bioagresseurs étudiés sont dus pour 60% au carpocapse, 30% au puceron cendré et 10% à la tavelure. Sur la base de cette pondération, nous avons agrégé les sévérités des dégâts des trois bioagresseurs, afin de donner un niveau de protection globale sous forme d'une note allant de 0 à 20, 20 étant la meilleure note. Cette note permet d'évaluer plus globalement les systèmes en termes de contrôle des bioagresseurs.

2.7. Simulation des dégâts des trois bioagresseurs étudiés et évaluation du modèle

La base de données requise pour la simulation des dégâts provoqués par les trois bioagresseurs étudiés doit fournir des informations concernant aussi bien les variables d'entrée du modèle (description des pratiques agricoles, des conditions du milieu, etc...) que les variables de sorties (dégâts à la récolte ou au pic de vol des pucerons). Comme déjà mentionné, nous avons utilisé les données récoltées en 2014 et 2015 auprès des dispositifs expérimentaux de Gotheron et de La Pugère décrits dans le chapitre 2. Les deux dispositifs étaient contrastés pour leurs conditions climatiques, l'âge du verger et la pression des bioagresseurs. Dans chaque site, trois types de systèmes de culture étaient mis en œuvre, différents en termes de pratiques de protection phytosanitaire ainsi que de conduite du verger.

2.7.1. Variables d'entrée

Les conditions climatiques, la conduite du verger, et les pratiques de protection phytosanitaire sont décrites dans le chapitre 2 (Tab. 2.3, 2.4 et 2.5 ainsi que les Annexes 2.D à G du Chapitre 2). La pression de chaque bioagresseur est décrite dans les Annexes 4.D, 4.E et 4.F. Certaines conditions du milieu comme l'éclairage autour de la parcelle, ou des caractéristiques du verger comme l'inégalité de la hauteur des arbres, ont été fournis directement par les stations d'expérimentation. En plus de l'année 2015, nous avons également récupéré les données observées pendant l'année 2014 à Gotheron.

2.7.2. Evaluation de la qualité d'ajustement du modèle

L'évaluation a consisté à comparer les données simulées et les données observées sur le terrain. Comme le modèle prédit des niveaux de dégâts qualitatifs (faible, moyen, fort, très fort), les valeurs prédites ont été transformées, après consultation des experts, en intervalles de valeurs de dégâts, i.e. 0-0.7%, 0.7–1.4%, 1.4%–3%, >3% de fruits touchés par le carpocapse, 0-3%, 3-8%, 8-20%, >20% de pousses infestées par le puceron, 0-1% , 1-3%, 3-5%, >5% de pommes infestées par la tavelure.

3. Résultats

3.1. Structure finale de l'arbre décisionnel du modèle

La structure finale de l'arbre est présentée pour chaque bioagresseur sur la Figure 4.13. Deux élément-clés différencient la structure de l'arbre selon le bioagresseur : le type de bioagresseur – ravageur ou maladie – et le nombre de cycles le caractérisant.

La biologie du carpocapse et celle du puceron cendré se prêtent bien à la décomposition de l'arbre en trois facteurs principaux : les pratiques culturales, les conditions climatiques et les conditions du milieu ayant un impact sur la biodiversité fonctionnelle des vergers (haies par exemple). La tavelure étant une maladie fongique, elle est surtout influencée par les conditions climatiques. Mais un couvert herbacé dans l'inter-rang peut favoriser ou défavoriser son apparition selon qu'il est bas ou haut. La situation topographique de la parcelle n'est pas non plus à négliger ; une situation dans un fond de vallée risque d'augmenter l'humidité de l'air et par conséquent le développement de la tavelure.

Le carpocapse pouvant présenter trois générations par an, la protection phytosanitaire contre ce bioagresseur a été décomposée en trois stratégies, avec des poids différents. Cela a augmenté le nombre d'attributs étant donné qu'il fallait tenir compte d'une nouvelle pression pour chaque génération et de l'ensemble des leviers d'actions de protection. Pour le puceron cendré, en revanche, la protection phytosanitaire s'est limitée à la lutte insecticide pré et/ou post florale, la lutte génétique et l'évitement par la précocité du débourrement de la variété utilisée (notamment concernant la période de débourrement). La tavelure est également polycyclique mais la lutte phytosanitaire contre cette maladie n'a été décrite que sur une échelle globale, pour simplifier la structure de l'arbre de décision, les traitements pouvant facilement atteindre une fréquence de 10 à l'échelle de l'année.

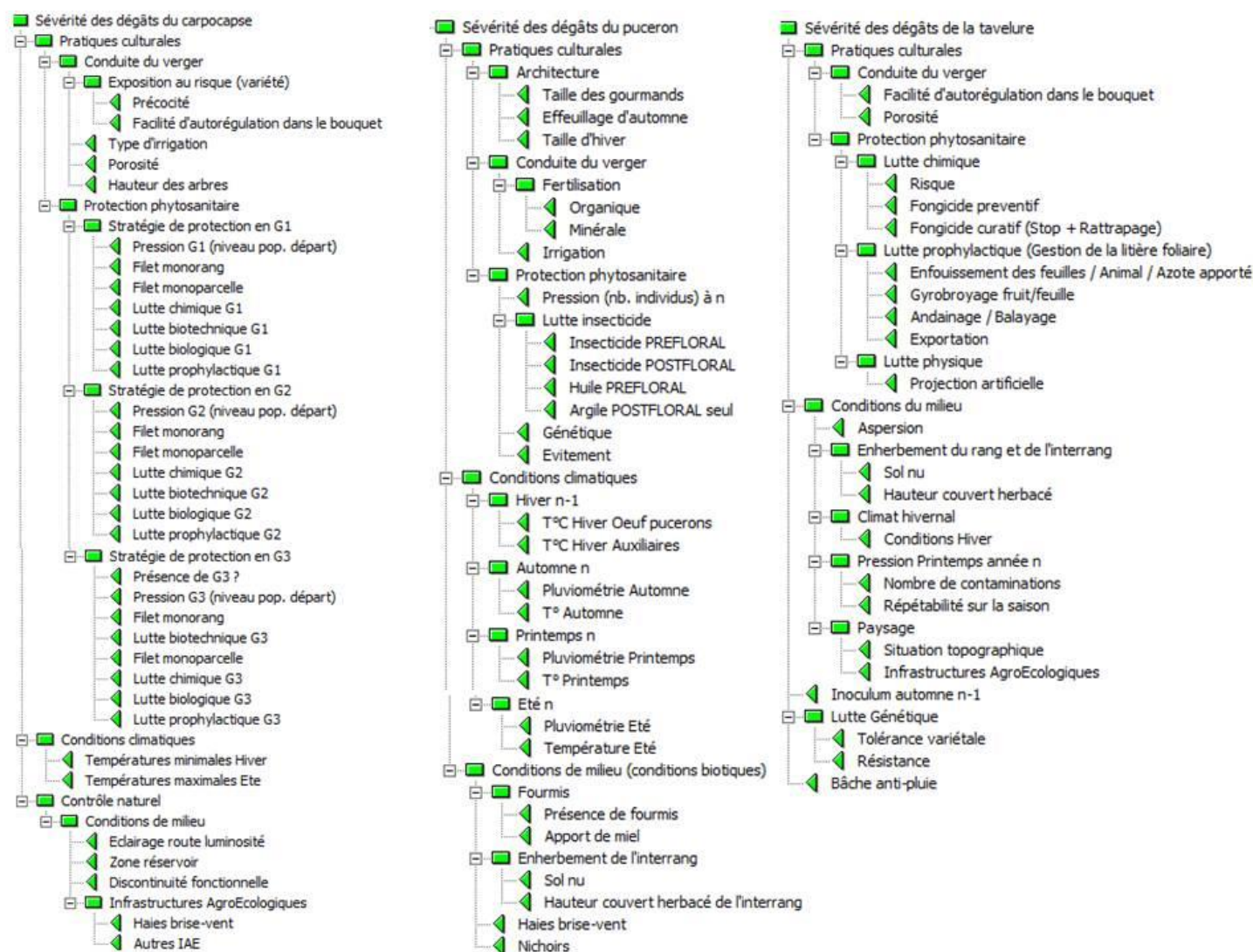


Figure 4.13: Arbres de décision sous IPSIM-Pommier des facteurs influençant les dégâts des 3 bioagresseurs principaux du pommier. De gauche à droite, l'arbre de décision pour le carpocapse, le puceron cendré et la tavelure. Chaque carré vert sur la gauche représente un nœud d'attributs, auquel correspond une table d'agrégation. Les triangles verts représentent les attributs de base, qui sont aussi les variables d'entrée du modèle.

3.2. Sorties du modèle et qualité d'ajustement

Le Tableau 4.4 présente les résultats de simulation d'IPSIM-Pommier pour l'année 2014 et 2015 sur les deux dispositifs et la Figure 4.14 présente la comparaison des valeurs simulées par IPSIM-Pommier à celles observées sur les dispositifs expérimentaux.

Carpocapse

En dehors du système conduit en agriculture biologique à Gotheron, qui présente un niveau assez fort de dégâts du carpocapse, les autres systèmes sont faiblement impactés par le carpocapse. Pour le système conduit en agriculture biologique, l'impossibilité d'utiliser des produits de synthèse, couplée au fait que le virus de la granulose a un effet souvent « retardé », laissant des intervalles de temps sans protection, diminue l'efficacité globale de la protection. Pour le site de la Pugère, le choix du filet Alt'carpo sur les systèmes bas-intrants et de la lutte chimique avec confusion sexuelle sur le système conventionnel assurent une très bonne efficacité de protection. En 2015, la pression sur le système conventionnel à la Pugère a été forte, ce qui a augmenté le niveau de dégâts du carpocapse sur le système conventionnel (« assez fort »). Par ailleurs, sur les systèmes bas-intrants, des trous dans les filets Alt'Carpo ont pu augmenter la présence de carpocapses. Ce facteur n'a pas été pris en compte par IPSIM-Pommier. Le système raisonné à la Pugère et le système « bas-intrants » à Gotheron présentent des dégâts observés plus élevés que le niveau de dégâts simulé par IPSIM-Pommier, ce qui peut être lié à un mauvais positionnement des insecticides.

Puceron cendré

La sévérité des dégâts du puceron cendré en 2014 a été faible pour tous les systèmes sauf celui conduit en agriculture biologique à Gotheron. En effet, les apports d'huile et d'argile sont moins efficaces que des pesticides chimiques. La pression était par ailleurs plus forte sur ce système que sur les deux autres systèmes du site de Gotheron. Le niveau de dégâts simulé par IPSIM-Pommier sur le système biologique est en adéquation avec le niveau de dégâts observé en 2014. En 2015, la pression était plus forte sur les systèmes « conventionnel » et « bas-intrants » de Gotheron qu'en 2014, augmentant le niveau de dégâts. Les valeurs simulées sont pour 2015 également en adéquation avec les niveaux observés.

Tavelure

Pour les deux années d'étude, la présence de tavelure sur Gotheron est assez forte due en grande partie à l'inoculum d'automne de l'année précédente, qui se trouvait être fort sur le système biologique et assez fort sur les deux autres systèmes. A la Pugère, seul le système présentant une

variété résistante à la tavelure présente un niveau faible de dégâts, vu l'importance du poids attribué à la lutte génétique (42%). En 2014, à la Pugère, pour le système conventionnel, il n'y a pas eu de fruits tavelés à la récolte. Or, les simulations présentent un niveau assez fort de dégâts liés à la tavelure. Cela est dû au fait que dans IPSIM-Pommier, sur le système conventionnel, la porosité a été décrite comme « moyenne », due à une densité de plantation plus forte que dans les deux autres systèmes. Cela a rendu l'impact général de la conduite du verger « Défavorable » à la protection contre la tavelure dans IPSIM-Pommier, contrairement à la valeur observée. En 2015 pour le système biologique à Gotheron, les dégâts de tavelure observés sur fruits à la récolte sont nettement supérieurs au niveau simulé par IPSIM-Pommier. Un mauvais positionnement des fongicides de contact (autorisés en agriculture biologique) - potentiellement lessivables - peut en être la cause.

Les systèmes sont globalement bien protégés. Le système biologique de Gotheron présente les notes les plus faibles pour 2014 et 2015 avec une pression en G2 plus forte en 2015 (ce qui a également baissé la note cette année-là). Pour le système conventionnel de La Pugère en 2015, la note globale est plus faible que les deux autres systèmes. Cela est lié d'une part à une plus forte pression de la G2 du carpocapse sur ce système mais aussi au fait qu'il n'est pas, comme les deux autres, protégé par un filet Alt'Carpo. Les notes plus faibles sur Gotheron en 2015 pour les systèmes conventionnel et bas-intrants peuvent être notamment expliquées par une pression en puceron plus forte en 2015.

Tableau 4.4: Sévérité des dégâts du carpocapse, du puceron cendré et de la tavelure sur les vergers de pommiers des deux dispositifs expérimentaux étudiés. Une note finale de niveau de protection est attribuée à chaque système. Les valeurs entre crochets représentent les gammes de valeurs quantitatives de dégâts, décrits par différentes unités: pour le carpocapse, c'est un pourcentage de fruits piqués à la récolte ; pour le puceron cendré, un pourcentage de rameaux infestés à la mi-mai ; pour la tavelure, un pourcentage de fruits tavelés à la récolte.

	Gotheron 2014			Pugère 2014		
	Conventionnel	Biologique	Bas-intrants	Conventionnel	Bas-intrants	Bas-intrants résistant tavelure
	Got_CON2014	Got_ORG2014	Got_LI2014	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2014
Abbréviations noms systèmes						
Carpocapse	Faible [0 – 0.7]	Assez forte [0.7 – 1.4]	Faible [0 – 0.7]	Faible [0 – 0.7]	Faible [0 – 0.7]	Faible [0 – 0.7]
Puceron cendré	Faible [0 – 3]	Forte [8 – 20]	Faible [0 – 3]	Faible [0 – 3]	Faible [0 – 3]	Faible [0 – 3]
Tavelure	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Faible [0 – 1]
Note finale	19	15	19	19	19	20
	Gotheron 2015			Pugère 2015		
	Got_CON2015	Got_ORG2015	Got_LI2015	Pu_CON2015	Pu_LI2015	Pu_LISR2015
	Abbréviations noms systèmes					
Carpocapse	Faible [0 – 0.7]	Assez forte [0.7 – 1.4]	Faible [0 – 0.7]	Assez forte [0.7 – 1.4]	Faible [0 – 0.7]	Faible [0 – 0.7]
Puceron cendré	Assez forte [3 – 8]	Forte [8 – 20]	Assez forte [3 – 8]	Faible [0 – 3]	Faible [0 – 3]	Faible [0 – 3]
Tavelure	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Assez forte [1 – 3]	Faible [0 – 1]
Note finale	17	11	17	15	19	20

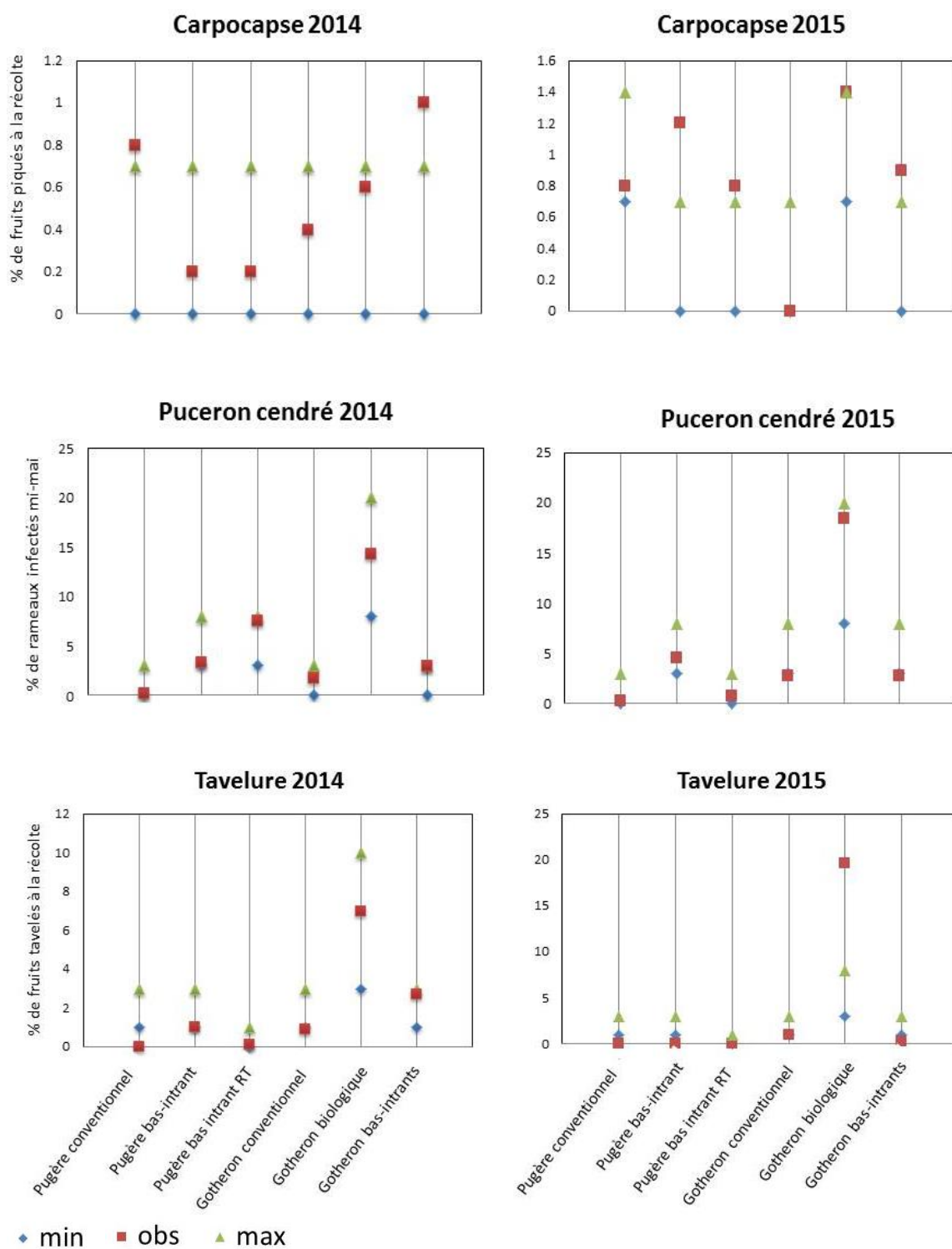


Figure 4.14: Comparaison entre les valeurs simulées par IPSIM-Pommier et les valeurs observées sur les différents systèmes présents dans les dispositifs de La Pugère et de Gotheron en 2014 et 2015 pour le carpocapse, la tavelure et le puceron cendré. Les valeurs sont données respectivement en % de fruits piqués à la récolte, % de fruit tavelés à la récolte et % de rameaux infestés à la mi-mai. « min » représente le minimum de la gamme de valeur simulée par IPSIM et « max » le maximum. « obs » représente la valeur observée sur les différents systèmes. RT signifie Résistant à la Tavelure.

4. Discussion

4.1. Validité d'IPSIM-Pommier

Les gammes de valeurs de dégâts observés ne dépassent pas, pour la majorité des systèmes étudiés, les valeurs simulées par le modèle IPSIM-Pommier. Cependant l'évaluation du modèle n'a été effectuée que sur 12 systèmes (3 systèmes sur 2 sites expérimentaux et sur 2 années), et il ne s'agit que d'une qualité d'ajustement. Une base de données représentant une plus large gamme de leviers de protection et de conditions de milieu est nécessaire pour évaluer la qualité prédictive du modèle. De plus il est important de noter qu'IPSIM-Pommier n'est valide que pour le sud-est de la France, la région des experts dont la contribution au modèle a été majeure.

Nous avons proposé une méthode pour gérer les « confrontations » entre experts et la divergence des avis (incluant les données de la littérature), grâce à un système de poids de la convergence des avis. Cette méthode mériterait d'être approfondie, notamment en retravaillant des entretiens collectifs. En effet, la fréquence de prise de parole pendant l'entretien collectif était très inégale entre experts ce qui a eu comme conséquence de créer un certain biais dans l'harmonisation des avis.

4.2. Intérêt de la conception d'IPSIM-Pommier

Nous avons réalisé une importante étude bibliographique et mobilisé les connaissances d'experts sous un angle nouveau : celui des dégâts. Trois éléments essentiels en découlent.

Dans IPSIM, on utilise des échelles qualitatives pour décrire la sévérité des dégâts. Etant donné qu'il est possible d'associer pour chaque classe qualitative une gamme de valeurs quantitatives, l'utilisateur est libre d'utiliser les échelles qualitatives comme il veut pour comparer les simulations avec des données observées. Cela permet de combiner des données provenant de différentes sources et avec des degrés de précision différents, dans d'autres contextes.

Deuxièmement, le fait de travailler sous l'angle des dégâts, soulève un problème récurrent aussi bien en expérimentation qu'en verger commercial : celui du manque d'enregistrement standardisé des suivis des dégâts au cours de la saison. Dans les expérimentations système que nous avons étudiées, nous avons bénéficié d'enregistrements précis des dégâts occasionnés par les bioagresseurs, ceux-ci servant généralement de paramètres pour les règles de décision de la protection. Cependant, dans de nombreuses expérimentations et dans les vergers commerciaux, les suivis sont souvent assez partiels ou utilisent des protocoles d'observation et d'enregistrement qui ne sont pas suffisamment standardisés pour permettre une analyse précise des liens entre pratiques, pression des

bioagresseurs et dégâts, ainsi que les relations entre les dégâts observés au cours de la saison et les pertes de récolte. Pourtant ces analyses sont importantes pour ré-examiner les seuils d'intervention utilisés, dont l'importance est majeure pour deux raisons : (i) ils permettent de déclencher les interventions de lutte et/ou définir des niveaux de risque acceptables selon la pression des bioagresseurs et les conditions du milieu, et (ii) ils permettent de contrôler des bioagresseurs par des méthodes préventives basées sur la combinaison de méthodes alternatives à effet partiel.

Enfin, le troisième élément nouveau de la conception d'IPSIM-Pommier, est qu'elle a demandé de hiérarchiser les facteurs impactant les dégâts des bioagresseurs sur le pommier grâce au système de pondération d'IPSIM. Cette hiérarchisation n'a encore jamais été formalisée et l'exercice n'a pas été évident pour les experts interrogés. C'est par ailleurs cette étape qui a été la plus difficile à gérer lors de l'entretien collectif à cause des confrontations entre experts.

4.3. Les limites du modèle

La première limite du modèle se rattache à la linéarité de l'arbre de décision, liée à la structure du logiciel DEXI. Cette linéarité est peu adaptée à une bonne prise en compte de la temporalité de la gestion des bioagresseurs. Ainsi il est difficile de considérer les étapes temporelles de l'itinéraire technique ainsi que la dimension dynamique des pertes de fruits ou de surface foliaire. Dans le premier cas et uniquement pour le carpocapse, nous avons pallié le problème en multipliant les sous-arbres de lutte phytosanitaire selon le nombre de générations possibles. Cependant, pour un bioagresseur comme la tavelure, dont le développement est très fortement conditionné par le climat, la précision du positionnement des interventions fongicides est déterminante pour assurer leur efficacité. La linéarité de l'arbre de décision ne permet pas de formaliser ces successions de traitements dans le logiciel DEXI. De ce fait, nous avons seulement pris en compte un risque moyen lié aux conditions climatiques de l'année, ce qui peut expliquer les écarts entre les données observées et les prédictions d'IPSIM-pommier. Un autre point important est le fait que l'interaction entre pratiques n'est pas considérée dans IPSIM. Par conséquent, un facteur comme la présence de nichoirs ou de haies composites favorisant les auxiliaires ne sera pas impactée par l'utilisation d'un insecticide, alors qu'il l'est en réalité.

Il est important de noter qu'en dehors du système conduit en agriculture biologique, les notes de niveau de protection des systèmes étudiés sont toutes supérieures à 15. Ces résultats s'expliquent par le fait que ces stratégies de protection ont été construites dans le but d'éviter au maximum les pertes économiques liées aux dégâts des bioagresseurs. Dans la stratégie « conventionnelle », qui sert de référence et se rapproche des stratégies utilisées par les agriculteurs de la région, l'utilisation de produits phytopharmaceutiques est la clé de voûte de la protection (même si certaines méthodes

comme la confusion sexuelle sont également utilisées). La stratégie « bas-intrants » présente un double objectif : maintenir un niveau de protection élevé tout en réduisant de moitié l'usage des produits phytopharmaceutiques. Dans ces conditions expérimentales, la combinaison des méthodes alternatives utilisées s'avèrent suffisamment efficaces pour contrôler les bioagresseurs étudiés. Ce résultat est important pour ce genre d'essais systèmes permettant de mesurer les performances de systèmes de culture innovants. Mais il a l'inconvénient dans ce travail de thèse d'offrir un faible gradient de dégâts pour tester IPSIM-Pommier. Ce gradient aurait également pu être plus visible si l'on avait pris en compte l'influence des conditions du milieu sur l'efficacité de certaines pratiques : par exemple un mauvais positionnement de fongicides de contact juste avant un épisode climatique déclenchant un risque grave pour la tavelure, des dates de fermeture du filet Alt'Carpo trop tardives par rapport aux premiers vols des carpocapses, un contournement de la résistance au champignon de la tavelure pour certaines variétés. Il serait également intéressant d'évaluer des systèmes sur plusieurs années consécutives. Une année présentant une mauvaise note, c'est-à-dire une année pendant laquelle le verger n'a pas suffisamment été protégé contre un ou plusieurs bioagresseurs, aura des répercussions sur l'année suivante via le niveau initial de pression des bioagresseurs : inoculum n-1 pour la tavelure, niveau de pression du carpocapse à la première génération.

Il faudrait aussi mettre davantage l'accent dans le modèle sur la lutte biologique par conservation, en particulier la régulation naturelle des bioagresseurs par prédation ou parasitisme, ainsi que les infrastructures agro-écologiques fournissant un habitat aux ennemis naturels des bioagresseurs. Il est difficile de comparer des moyens de lutte dont l'efficacité sur les dégâts causés par les bioagresseurs a été démontrée quantitativement (lutte chimique, résistance variétale, barrière physique par filet de protection) à des moyens de contrôle comme la lutte biologique par conservation. En effet, les performances espérées de cette dernière sont en général le maintien du niveau de dégâts en dessous d'un niveau de pertes économiques beaucoup plus élevé que pour un verger conduit de manière conventionnelle (Gurr et al. 2000). La lutte biologique par conservation pourrait être étudiée dans un arbre de décision à part, afin de donner une plus grande importance à la régulation des bioagresseurs par les ennemis naturels. Cela impliquerait par ailleurs la prise en compte d'une échelle spatio-temporelle bien plus large que le couple 'parcelle x année' utilisé dans notre étude.

5. Conclusions et perspectives

IPSIM-Pommier permet d'estimer les impacts d'un ensemble de pratiques sur les dégâts causés par les bioagresseurs du pommier, tout en considérant à la fois les conditions du milieu et la pression du

bioagresseur à différentes périodes de la campagne culturale. Il est ainsi possible d'évaluer a posteriori des itinéraires techniques pour la protection du pommier.

Dans ce travail de thèse, IPSIM-Pommier représente un outil intéressant pour évaluer les pertes de fruits et de feuilles causées par les bioagresseurs, tandis que le modèle STICS permet de simuler des processus d'interaction entre le sol et la plante, liés aux cycles du carbone, de l'eau et de l'azote, et in fine plusieurs services écosystémiques dont le rendement (chapitre 3). Le couplage des deux modèles va permettre de progresser dans l'analyse de services écosystémiques en vergers. En effet, dans le chapitre 5, le service de contrôle des bioagresseurs sera décrit implicitement via le rendement, ou plus précisément le gain de rendement (i.e. la réduction des dommages liés aux dégâts, autrement dit des pertes de récolte) induit par un certain niveau de contrôle des bioagresseurs. Le rendement est en effet directement impacté par une perte de fruits due au carpocapse ou à la tavelure, ou encore indirectement impacté par une perte de surface foliaire due au puceron cendré.

Dans son état actuel, IPSIM-Pommier est utilisable sur des vergers de pommiers proches des systèmes étudiés dans le sud-est de la France, mais il nécessite une évaluation plus poussée sur un nombre de systèmes de culture plus élevé. Il pourrait être un outil performant de médiation entre un conseiller et un agriculteur pour évaluer le volet protection des cultures de l'itinéraire technique utilisé, dans une démarche de co-conception de systèmes agricoles. La possibilité de coupler ce modèle à d'autres modèles existants, surtout ceux structurés sur une base DEXI, permettrait : (i) d'avoir des simulations plus précises – cas du couplage avec un modèle de prévision des risques basé sur des données climatiques, (ii) d'ajouter d'autres types de variables de sortie, comme par exemple l'IFT (indice de fréquence de traitement) ou encore des données socio-économiques (temps de travail, amortissements, prix des intrants).

CHAPITRE 5 : ANALYSE DES CONFLITS ET SYNERGIES ENTRE SERVICES ECOSYSTEMIQUES MULTIPLES EN SYSTEMES DE CULTURE FICTIFS



A SIMULATION STUDY OF SYNERGIES AND CONFLICTS BETWEEN MULTIPLE ECOSYSTEM SERVICES IN APPLE ORCHARDS⁵

Abstract

Fruit tree production faces a twofold challenge: ensuring a good productivity while preserving natural resources and human health. To take up this challenge, sustainable solutions are required, which could be investigated through the rising concept of ecosystem service. It is critical to understand how management changes relationships between multiple ecosystem services – conflicts or synergies- and thus ecosystem service profiles in orchards. In this paper, we contribute to this understanding for the case of apple orchards, using an approach that decomposes the establishment of relationships between ecosystem services.

Five ecosystem services were considered: fruit production, soil nitrogen availability, climate regulation, pest and disease control and water regulation. Together with these five services, we considered environmental disturbance due to pesticides. Ecosystem functions and services were described by specific indicators that were quantified using modelling tools parameterized on apple orchards: the STICS soil crop model and the IPSIM modelling framework. Simulations of functions and derived services were performed using these modelling tools, in a single pedoclimatic condition and for 150 virtual apple orchard cropping systems designed by varying the modalities of nitrogen fertilization, irrigation, and the control of the main apple pests, codling moth, rosy apple aphid and apple scab. The results were analyzed using two-table multivariate analyses, hierarchical clustering and radar plots.

We found three main conflicts and two synergies among the studied ecosystems services. Each of these conflicts and synergies are explained by underlying functions, which are driven by agriculture practices. For example, N denitrification prevention appeared to be in conflict with yield, carbon sequestration and mean fruit mass, mostly due to nitrogen absorption. This function decreases when organic fertilizers are exclusively used and when irrigation inputs are reduced. The synergy between yield and carbon sequestration was mostly due to the carbon allocation to fruit, which is clearly a specificity of orchards compared to other ecosystems. Water supply appeared to impact ecosystem functions such as nitrogen mineralization and the resulting services such as organic nitrogen variation. Yield was negatively correlated to fruit and foliar surface losses due to pests. Some pest control practices, such as rain-proof cover used to control apple scab, had a possible impact on soil functions such as humification. We identified five cropping systems optimizing both marketed and

⁵ Ce chapitre va être soumis au journal 'Agriculture, Ecosystems & Environment'

non-marketed services. They were characterized by organo-mineral fertilization not exceeding 70 kg N/ha/year, comfort irrigation, codling moth protection nets, apple scab resistant cultivar and the use of pesticides for rosy apple aphid control.

This approach could be useful to guide the design of innovative apple orchard cropping systems aiming at finding acceptable tradeoffs among ecosystem services, and to implement the necessary dialogue between fruit growers and other stakeholders.

Keywords: fruit production, soil nitrogen availability, climate regulation, water regulation, pest and disease control, cropping system, modelling, STICS, IPSIM, PCAIV, optimization.

1. Introduction

Since the Millennium Ecosystem Assessment in 2005 (Reid et al. 2005), the ecosystem service concept has been expanding worldwide, emphasizing the importance of ecosystem's non-marketed performances. Agroecosystems, beyond the food production service, may provide multiple non-marketed services such as soil structure and fertility, water quantity and quality, biological pest control, pollination, or climate regulation through carbon sequestration and greenhouse gas (GHG) mitigation (Heal and Small 2002; Rodríguez et al. 2006; Zhang et al. 2007; Swinton et al. 2007; Bennett et al. 2009). There are positive (synergies) or negative relationships (conflicts) between multiple ecosystem services, which are functional or caused by common drivers (Bennett et al. 2009). These relationships are heavily impacted by agricultural practices as well as pedoclimatic conditions, which necessarily change the agroecosystem's functioning. The cascade model of Haines-Young and Potschin (2009) places ecosystem services in the middle of a 'production chain'. This model links up biophysical structures – in other words the biotic and abiotic environment, - ecosystem functions, which are all the ecological processes occurring in an ecosystem, the services drawn out of these functions and the benefits drawn out of these services. Two major limitations in the ecosystem service assessment research have been highlighted. The first one is the lack of ecosystem services quantification. The second one is that, although many authors have worked on two-sided ecosystem service trade-offs - usually food production and a non-marketed service in agroecosystems - few studies focus on multiple ecosystem services relationships. There is also a lack of use of models to address these two questions according to the review of Seppelt et al. (2011).

To this day, there has been little focus on ecosystem services in fruit orchard research. However, orchards appear to be an interesting field of study, among other reasons because of the impact of their perennial character on biogeochemical cycles and of their potential in terms of biodiversity (Simon et al. 2010).

In this study, we addressed the case of apple orchards and investigated the relationships between five important ecosystem services: fruit production, soil nitrogen availability, climate regulation, water cycle maintenance and regulation including water quality, and pest and disease control. Together with these five services, we considered environmental disturbance due to pesticides. To help understanding these relationships, we considered important ecosystem functions underpinning the selected ecosystem services, i.e. carbon, nitrogen and water balance processes as well as pest injuries. We also considered agricultural practices dealing with crop and pest management and acting on these functions.

In order to decompose the establishment of multiple ecosystem service conflicts or synergies, we propose a specific approach with 3 main stages: (i) the identification of indicators describing the ecosystem functions and ecosystem services, (ii) the simulation of orchard functioning driven by different cropping systems using models, whose inputs describe agricultural practices and whose outputs quantify the indicators and (iii) the linkage between practices, ecosystem functions and ecosystem services using different data analysis methods and tools.

2. *Materials and methods*

2.1. General approach

Figure 5.1 describes the general approach used in this study. Apple orchard cropping systems were created *in silico* (see Section 2.4), based on 5 different agricultural practices in a given pedoclimatic context. These practices and pedo-climatic characteristics were considered as model inputs. The models simulated indicators of ecosystem functions and services. These indicators were thereafter analyzed using two principal component analyses with respect to instrumental variables (PCAIV), in order to formalize, on the one hand, the links between agricultural practices and ecosystem functions, and, on the other hand, the links between ecosystem functions and ecosystem services. A typology of apple orchard cropping systems was then defined using hierarchical clustering, and characterized in terms of ecosystem service profiles. This paved the way for an exploration of optimal trade-offs between marketed and non-marketed services among the analyzed cropping systems.

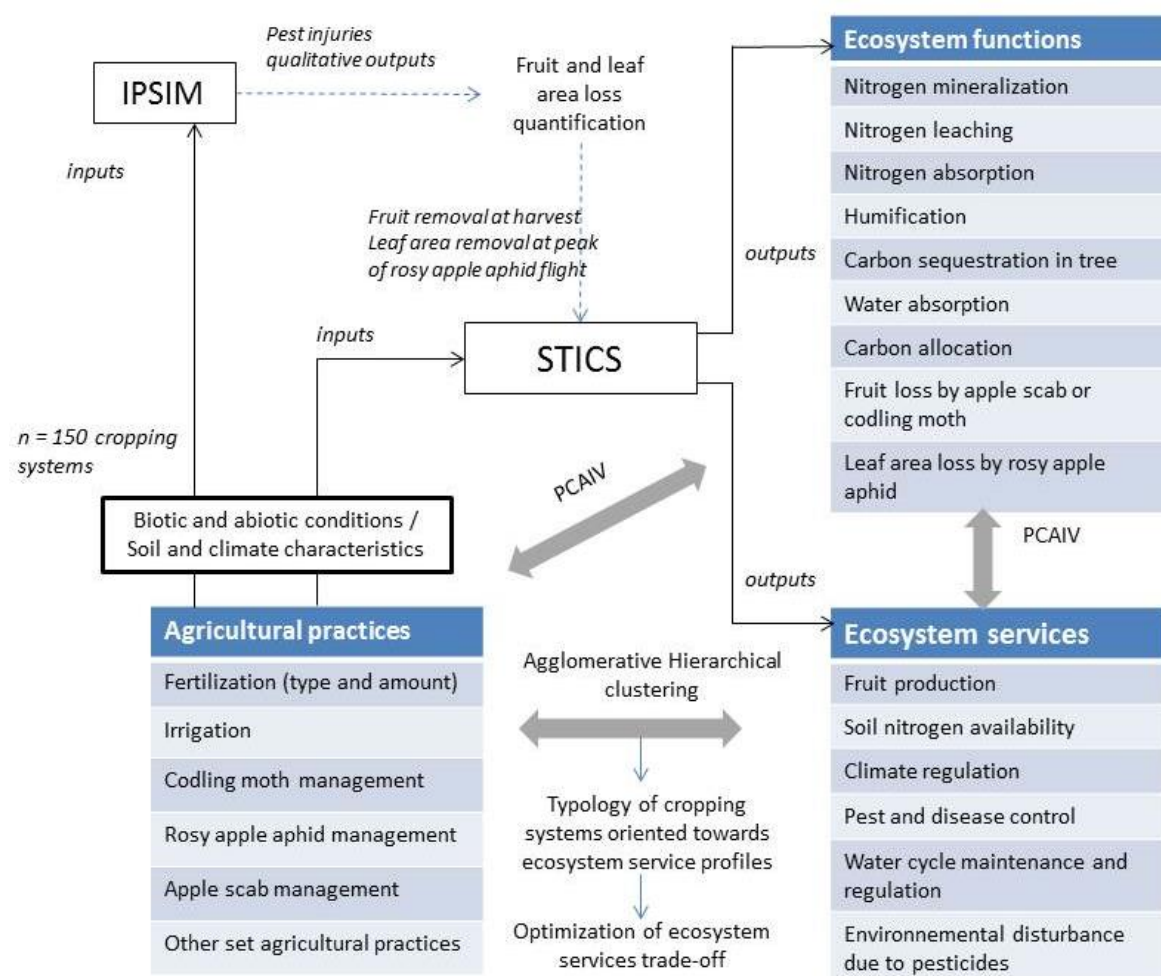


Figure 5.1: Illustration of the general approach used for analyzing ecosystem services conflicts and synergies in apple orchards. Agricultural practices, ecosystem functions and ecosystem services are linked together through indicators, models and data analysis tools.

2.2. Ecosystem service and ecosystem function indicators

Indicators describing ecosystem services are presented in Table 5.1. Soil nitrogen availability was described by a long term indicator - organic nitrogen variation, representing the level of organic nitrogen stored in the soil every year - and a short term indicator, which is the mean annual NO_3 concentration in first soil layer (0-30 cm). For climate regulation, we considered the mitigation of nitrous oxide (N_2O) coming from denitrification as well as the mitigation of CO_2 emissions through carbon sequestered in the soil and the annual organs of trees. Water cycle maintenance and regulation, including water quality, was described by water content in soil, drainage and nitrate leaching prevention. Fruit production was described by gross yield and mean fresh fruit mass. Finally, we also considered the mitigation of environmental disturbance due to pesticides, and we used the reduction of the treatment frequency index as a proxy. The pesticide treatments concerned only the

three main apple pests, codling moth (*Cydia pomonella*), rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginae*) and apple scab (*Venturia inaequalis*; see Section 2.3). The service of pest and disease control was not directly described by an indicator. It was implicitly considered through the fruit production indicators (yield and fruit mass), impacted by pest injury.

Table 5.1: Ecosystem services indicators, abbreviated names and units.

Service	Indicator	Abbreviated name	Unit
Soil nitrogen availability	Yearly variation of organic nitrogen	varNorg	kg N/ha/year
	Mean nitrate concentration in 0-30 cm soil layer	meanNO3	mg N-NO ₃ /kg of dry soil
Climate regulation	Prevention of nitrogen denitrification	N2Oprev	kg N-N ₂ O/ha/year
	Quantities of carbon fixed in soil and in the annual organs of the tree	Cseques	kg C/ha/year
Water cycle maintenance and regulation	Mean soil humidity in 0-30 cm soil layer	meanHum1	% soil dry mass
	Water drainage	drainage	mm/year
	Nitrate leaching prevention	waterNO3prev	mg NO ₃ /L of drained water
Fruit production	Yield	yield	t/ha
	Mean fresh fruit mass (quality criterion for the market)	Fruitmass	g
Mitigation of environmental disturbance due to pesticides	Reduction of the treatment frequency index (treatments concern codling moth, rosy apple aphid and apple scab)	TFIreduc	Dimensionless

We described 10 ecosystem functions (Tab. 5.2). In soil, mineralization and leaching were described by the quantity of nitrogen transformed in kg N/ha/year. Humification corresponded to the carbon sequestered in the soil organic matter in kg C/ha/year (Saffih-Hdadi and Mary 2008), while carbon sequestration was described by the carbon fixed yearly in the annual organs of the tree (fruits, leaves

and stems). The two are related to the climate regulation service. Water use for fruit production was described by the mean value of all daily stomatic sufficiency indexes from fruit set to harvest, ranging from 0 to 1, 1 being the maximal comfort value. This index is the equivalent of relative transpiration, i.e. the ratio of actual transpiration to maximal transpiration (Brisson et al. 1998a). Nitrogen stress was described by a nitrogen nutrition index, also ranging from 0 to 1, 1 being the comfort value (Lemaire and Gastal 1997). Nitrogen absorption by the tree was defined as the maximal quantity of nitrogen absorbed by fruits, leaves and stems on a yearly scale. Carbon allocation to fruits was described by the quantity of carbon cumulated within a year in fruits, calculated as the fruit dry biomass at harvest multiplied by the mean carbon content of fruits. For pest injury functions, fruit and leaf area losses were described respectively by a percentage of lost fruit due to codling moth or apple scab, and a fraction of LAI removed due to rosy apple aphid infestation.

Table 5.2: Ecosystem functions indicators, abbreviated names and units.

Function	Indicator	Abbreviated name	Unit
Mineralization	Quantity of nitrogen mineralized	Nmineralized	kg N/ha/year
Leaching	Quantity of nitrate leached in water drainage	Nleached	kg NO ₃ -N /ha/year
Humification	Carbon sequestrated in soil	Cseques_soil	kg C/ha/year
Carbon sequestration	Carbon sequestrated in tree's annual organs (fruits, leaves, stems)	Cseques_tree	kg C/ha/year
Water use for fruit production	Mean stomatic water sufficiency (index varying between 0 –high water stress- and 1 – no stress)	Watercomfort	dimensionless
Nitrogen nutrition	Nitrogen nutrition index (index varying between 0 – high nitrogen stress – and 1 – no stress)	NNi	dimensionless
Nitrogen absorption	Maximal quantity of nitrogen absorbed by the annual organs	Nabsorbed	kg N/ha
Carbon allocation	Carbon quantity in fruits at harvest	Cfruit	kg C/ha
Fruit loss due to codling moth	Percentage of fruit loss	fruitloss	dimensionless

or apple scab

Foliar surface	LAlloss_aphid	dimensionless
loss due to rosy apple aphid	Fraction of daily leaf area loss	

2.3. Models

Two models were used to quantify ecosystem functions and services indicators.

The first model was STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards), a soil-plant simulation model (Brisson et al. 1998b; Brisson et al. 2009). The global functioning of the STICS model is based on the elaboration of a foliar surface which intercepts light, converts it into biomass and allocates carbon to three types of aboveground organs: fruits, leaves and annual stems, as well as roots. STICS also describes water and nitrogen balances within the plant and soil compartments. Stress indices are calculated in water and nitrogen balance modules, reducing, if any, leaf growth and biomass accumulation. Inputs concern climate, soil, and crop management, as well as nitrogen and water quantities in soil and above and belowground biomass on the first date of the simulation. For crop management, the main agricultural practices are nitrogen fertilization, irrigation, plant density, fruit thinning and leaf removal. The model produces a considerable set of outputs that can be used as indicators of ecosystem functions and services. STICS was parameterized and evaluated on apple orchards, using 9 apple orchard systems that presented different pedoclimatic conditions and different agricultural management (see Chapter 3).

IPSIM is a qualitative aggregative modeling framework that predicts injury profiles as a function of two factors: agricultural practices, abiotic - climate in particular - and biotic environment - especially pest biological control potential (Aubertot and Robin 2013). The model is based on a qualitative prioritization of these factors, structured in a decision tree that enables the simulation of an injury profile of the pest with respect to the considered crop. IPSIM was implemented in the DEXi software, a computer program for multi-attribute decision making (Bohanec et al. 2004). It was parameterized on apple orchards for the three most important apple pests: codling moth, rosy apple aphid and apple scab (see Chapter 4). Factors impacting the potential pest injuries were determined using a bibliographic study and experts' opinion. The outputs of the model corresponded to a qualitative level of pest injury on either fruits – for codling moth and apple scab – or shoots – for rosy apple aphid. Apple scab injury on leaves was not taken into account.

For each pest, the qualitative injury levels simulated by the IPSIM-Pommier model were converted into quantitative values in order to couple them to the functioning of the STICS model (Tab. 5.3). Rosy apple aphid injury was converted into a fraction of daily leaf area loss, corresponding, in the STICS model, to leaf area removal from the peak of rosy apple aphid flight, i.e. in mid-May, to the tree's maximal leaf area establishment (mid-July). Injury levels due to codling moth or apple scab were converted into percentages of marketable fruit loss. These two types of fruit loss, considered as two compatible and independent events, were combined into a general fruit loss percentage, which was simulated at harvest in the STICS model.

Table 5.3: Conversion of qualitative outputs of the IPSIM model into quantitative values and linkage with the STICS model

	Qualitative pest injury levels	Corresponding type of injury in STICS	Quantitative loss due to pests
			fraction of daily foliar surface loss
Rosy apple aphid	Very high	Leaf area removal (beginning at the peak of rosy apple aphid flight)	0.9
	High		0.6
	Medium		0.2
	Low		0
Codling moth	Very high	Fruit removal (at harvest)	80%
	High		30%
	Medium		15%
	Low		0
Apple scab	Very high	Fruit removal (at harvest)	80%
	High		30%
	Medium		15%
	Low		0

2.4. Designing virtual apple orchard cropping systems

In order to create apple orchard cropping systems, we varied an array of 5 agricultural practices, while all the other management levers were considered fixed. Thus, the Golden Delicious cultivar was used, planted on bare soil with a planting density of 2000 trees/ha, inter-row spacing of 4 meters and a maximal tree height of 3 meters. The crop load before fruit loss due to pests was 300 fruits per tree. Biotic and abiotic environmental conditions were also fixed for all cropping systems.

2.4.1. Combination of agricultural practices modalities and sampling of apple orchard cropping systems

We defined different modalities for nitrogen fertilization, irrigation, codling moth control, rosy apple aphid control and apple scab control (Tab. 5.4). Nitrogen fertilization was described by the fertilizer's type (mineral, organic or both) and quantity (0, 70 and 140 kg N/ha). Irrigation was triggered each time the stomatal water sufficiency index of the STICS model was under a specific threshold whose values were comfort (1), low water stress (0.7), and high water stress (0.4). The modality 'no irrigation' was also considered. For each pest we used a set of four to five control modalities with different efficacies, as well as a 'no protection' modality (Beers et al. 2003; Grove et al. 2003; Holb 2005; Laget et al. 2015). All pesticide applications were considered effective. The combinations of the five practices' modalities defined the space of the possible virtual orchard cropping systems. Some constraints were imposed on these combinations for the sake of realism and to simplify the number of combinations to facilitate the interpretation of results. Thus, it was not possible to have only one pest out of the three with no control (e.g. codling moth with no control and rosy apple aphid with chemical control and apple scab with cultivar resistance). In addition, it was not possible to combine biocontrol (abbreviated as 'bc' on Table 5.4) and chemical control for codling moth and rosy apple aphid management. Out of the 1148 possible combinations, 150 cropping systems were randomly selected. The distribution of the different modalities of the agricultural practices in the 150 cropping systems is detailed in Appendix 5.A.

Table 5.4 : Agricultural practices and their modalities. Each practice or modality is described by an abbreviated name.

	Agricultural practice	Abbreviated names for agricultural practices	Agricultural practices modalities	Abbreviated names for agricultural practices modalities
Cultural practices	Nitrogen fertilization : type x quantity (kg/ha) of fertilizers	FERTImin	Mineral 140 Mineral 70	min140 min70
		FERTImin_org	Mineral + organic 140 Mineral + organic 70	min_org140 min_org70
		FERTIorg	Organic 140 Organic 70	org140 org70
		no_fert	No fertilization	no_fert
	Irrigation : water input level	IRRI	Comfort Low water stress High water stress No irrigation	com LWS HWS no_irrig
Pest control practices	Codling moth control	CM	Exclusion nets	CMnet
			Granulovirus + mating disruption	CMbc
			Chemical pesticides + mating disruption	CMch
			No control	CM0
	Rosy apple aphid control	AP	Oil and/or clay applications	APbc
			Oil + chemical pesticides	APch1
			Chemical pesticides	APch2
			No control	AP0
	Apple scab control	SC	Chemical fungicides	SCch
			Sulfur and copper (products authorized in organic agriculture)	SCbc
			Resistant variety	SCvar
			Rain proof cover	SCcov
			No control	SC0

2.4.2. Biotic and abiotic environment

Biotic environmental conditions include pest pressure as well as the occurrence of natural biological control. In the IPSIM model, we made the hypothesis that pest pressure was high for all pests, at any generation or infection, regardless of climatic conditions used in the STICS model. Agro-ecological infrastructures were considered to be present and equally favorable to the pest's natural enemies in all cropping systems.

Soil and climate characteristics were identical in all cropping systems and represented well the southeastern French region, which is the first apple production area in France.

Soil was heavy, with clay loam texture (20 % clay), no pebbles, a pH of 8.5 and a nitrogen organic content in dry soil of 1 g/kg of dry soil in the first soil layer. Soil bulk density was fixed at 1.3, and water field capacity was at 25% of soil dry mass with an available water storage capacity of 98 mm. Initial C/N ratio of soil humus was fixed at 9.5. Soil depth was 60 cm.

Climate characteristics corresponded to the 2015 year data of Salon-de-Provence climate station (43.63N, 5.10W). The climate was Mediterranean, with a mild winter (8.5 °C as mean temperature between January and March), a hot and dry summer (July's mean maximal temperature went up to 32 °C with 5 mm cumulated rainfall) and the Mistral wind, a cold and dry wind coming from the North. Annual rainfall was 633 mm. The daily actual evapotranspiration minus rainfall cumulated from the 1st of April to the 30th of September was 516 mm.

The apple tree phenology was based on the crop's phasic development of the STICS model. Based on the tree's dormancy and the climate data, budburst occurred on the 20th of March, full bloom on the 20th of April, fruit set on 6th of May and harvest on the 21st of September.

2.5. Data analyses

We performed $n = 150$ simulations with the STICS model corresponding to the 150 sampled cropping systems. Based on the results, we built three data tables, X_{np} , Y_{nq} and Z_{nr} . X_{np} contained $p=18$ 'explanatory' variables that described the agricultural practices of the n simulated systems (Tab. 5.4). Pest control practices as well as nitrogen fertilization type variables were categorical (0/1), whereas irrigation and fertilizer quantity variables were ordinal, i.e. 1 to 4 for irrigation (from no irrigation to hydrological comfort, see Table 5.4) and 1 to 2 for fertilizer quantities. Y_{nq} contained $q=10$ 'response' variables that described the indicators of the ecosystem functions of the n simulated systems (Tab. 5.2). The dependence of the 'response' variables Y on the 'explanatory' variables X was analyzed using a Principal Component Analysis with respect to Instrumental Variables (PCAIV; Sabatier et al.,

1989). PCAIV is a statistical tool for exploratory analysis, particularly suitable for analyzing the relationships amongst the response variables conditionally on the explanatory ones. PCAIV first performs multiple regressions of the q variables of Y on the p variables of X . This results in a new data table Y_m of 'modeled' response variables. Y_m represents the part of ecosystem functions linearly explained by the agricultural practices. Then, Y_m is analyzed by a standardized principal component analysis (PCA). The solution of PCAIV is displayed in correlation plots where 'modeled' response variables and explanatory variables are represented by means of vectors whose coordinates are the correlations between two PCA components. The cosines of angles are equivalent to correlations. The vectors with lengths close to one are the most important for the interpretation of the plane. In the next step of the analysis, the relationships between ecosystem functions and ecosystem services were analyzed using the same PCAIV method. This time Y_{nq} became the data table with the q 'explanatory' variables - ecosystem function indicators - and Z_{nr} contained the 'response' variables, with $r=10$ ecosystem service indicators (Tab 5.1). PCAIVs were evaluated with the inertia (R^2 , in %) of the response variables explained by the explanatory variables.

We used agglomerative hierarchical clustering (AHC) to define a typology of cropping systems according to their ecosystem service delivery. AHC was performed on the 150 orchard cropping systems described by their coordinates on the major components of the second PCAIV, with Ward's method and squared Euclidian distance (Everitt et al. 2011; Murtagh and Legendre 2014). The mean values of the ecosystem service indicators were calculated for each group defined from the AHC results, and normalized with respect to the maximal value of the service over the 150 studied cropping systems.

Ecosystem service profiles were represented by means of radar plots using these normalized values. In the case of disservices, i.e. when the ecosystem service indicator had a negative value, we used 1 minus the normalized absolute value for the sake of homogeneity in ecosystem service profiles (Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014). That way, a value close to zero on the radar plot indicated a low level of service and a value close to 1 a high level of service.

In order to identify the cropping systems which optimized the trade-off between marketed and non-marketed services, the 150 cropping systems were plotted in a decision space represented by two criteria: the mean normalized value of marketed ecosystem service indicators (i.e. yield and mean fruit mass) on the x-axis and the mean normalized value of non-marketed ecosystem service indicators (i.e. all the other indicators) on the y-axis. To evaluate the trade-offs between these two criteria, we used the concept of Pareto-dominance. The set of 'non-dominated' cropping system trade-off solutions, known as Pareto- optimal solutions, represented the best trade-offs across all

criteria since no other cropping system is more effective when all of the services are considered. Among these cropping systems, we identified the ones that had the shortest distance to a theoretical ideal solution, i.e. in which both criteria scored for the maximal value.

3. Results

3.1. Agricultural practices heterogeneously impact ecosystem functions

The first PCAIV, applied on the 150 cropping systems, indicated that agricultural practices accounted for an important part of the variation of ecosystem function indicators ($R^2=83.7\%$, $P<0.01$). The first two principal components of the PCAIV explained 81.6% of the total variance (Fig. 5.2A and B). Agricultural practices and ecosystem functions were well distributed on the PCAIV projection plane.

3.1.1. Nitrogen and water related functions

Plant response to water varied along with the decrease of irrigation water inputs (Fig. 5.2A and B). The irrigation intensity (IRRI) ranged from 0 for no irrigation to 500 mm/year, which corresponds to intensive orchard management. It had a considerable effect on water comfort (Fig. 5.3A). The irrigation intensity was related to an increase of nitrogen mineralization (Fig. 5.3B) as well as a decrease of C sequestered in soil. These effects are due to the fact that the biological activity supporting soil nitrogen mineralization depends on soil moisture and that carbon sequestration in soil is antagonistic to nitrogen mineralization. The close proximity of carbon allocated to fruit and carbon sequestered in tree's annual organs on the PCAIV plane was indicative of the large contribution of fruit to carbon sequestration in the tree. Nitrate leaching, carbon sequestration in tree's annual organs, nitrogen absorption and nitrogen nutrition index were all positively correlated to irrigation intensity and nitrogen fertilization gradients (Fig. 5.2A and B). However, the impact of irrigation on carbon sequestered in tree's annual organs (Fig. 5.3C) seemed weaker than that of fertilization (Fig. 5.4D). Nitrogen absorption response depended first on the type of fertilizer and second on the quantity applied. Fertilization impacted carbon sequestration in tree's annual organs, nitrogen absorbed and nitrogen nutrition index in a discontinuous way, with a jump between mineral or organo-mineral modalities yielding higher values and organic or 'no fertilization' modalities yielding lower values (Fig. 5.4A, B and D), but it increased nitrate leaching in a continuous way (Fig. 5.4C). For intensively fertilized cropping systems (min140), we observed a high variability of nitrate leaching quantities due to the combined effect of water and nitrogen inputs. In the min140 cropping systems,

low nitrate leaching values corresponded to the use of covers for scab control, which prevented rainfall. Carbon sequestration in tree's annual organs was slightly lower in intensively fertilized cropping systems (min140) than in cropping systems less fertilized (min70; Fig. 5.4D). This is due to aphid control: in the sample of cropping systems, intensive fertilization was often combined with aphid biocontrol, which decreased C sequestered in tree's annual organs (Fig. 5.5B).

3.1.2. Pest control related functions

The second component of the PCAIV plan was determined by pest control practices for the three pests (codling moth, rosy apple aphid and apple scab), as well as fruit and leaf area loss (Fig. 5.2A). Chemical pest control and exclusion nets were negatively correlated with fruit and leaf area losses, whereas systems without pest protection showed high losses. Biological control lies between these two extreme situations. Codling moth and apple scab control modalities other than rain proof cover against apple scab (SCcov) affected only fruit loss. It is interesting to note that SCcov was positively correlated on the first component of the PCAIV with carbon sequestration in soil, most likely because rain proof covers prevent the supply of rainwater and decreases the soil water content.

The control of rosy apple aphid had an impact not only on leaf area loss, but also on C sequestered in annual organs. The effect is not visible when all cropping systems are considered, but on intensively fertilized and irrigated cropping systems, it is clear that chemical control increased carbon sequestration compared to oil or clay application and no control (Fig. 5.5).

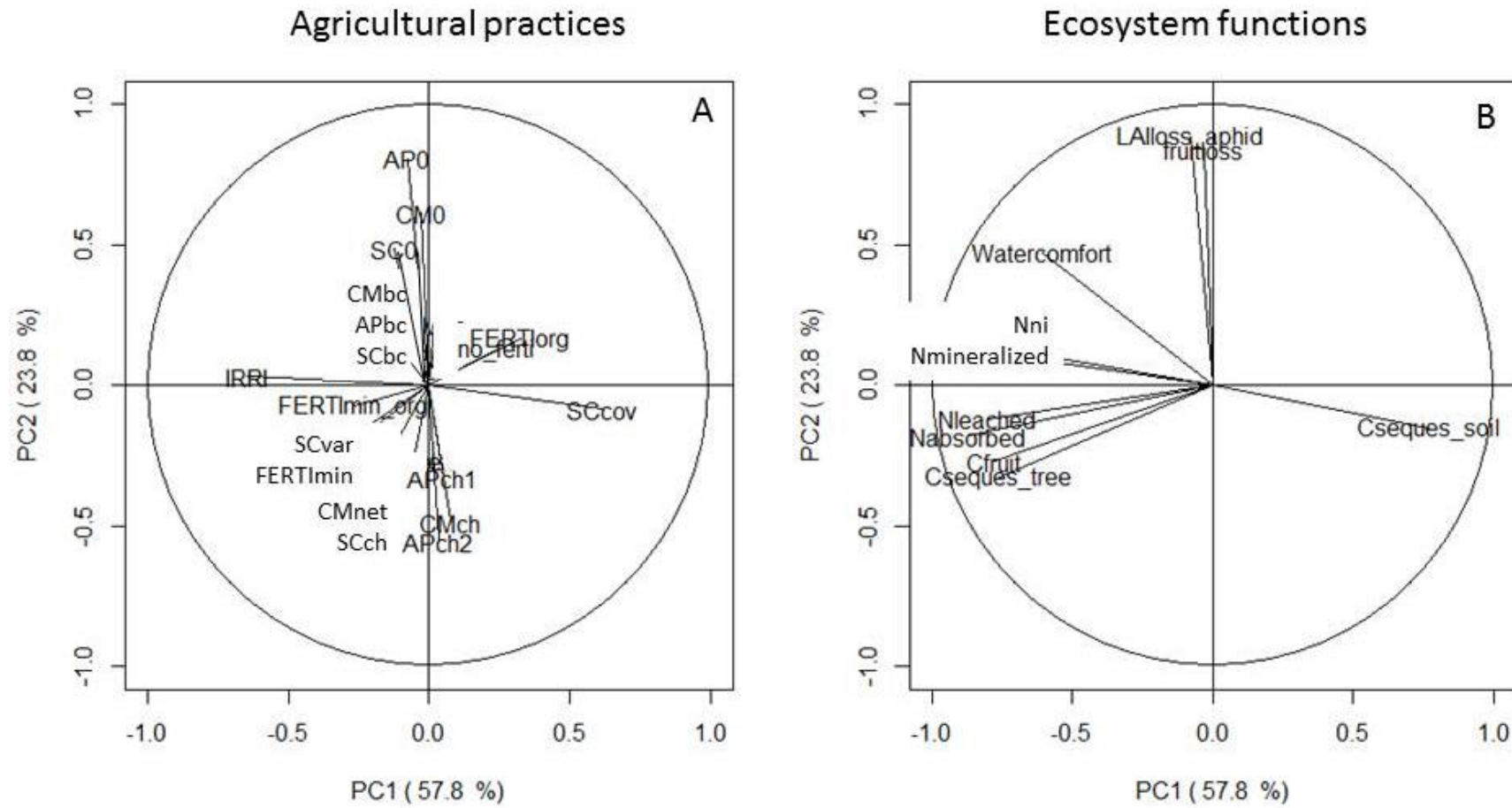


Figure 5.2: Correlation plots of explanatory variables, i.e. agricultural practices (A), and of response variables, i.e. ecosystem functions (B) with respect to the first two PCAIV components (PC1 and PC2). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4.

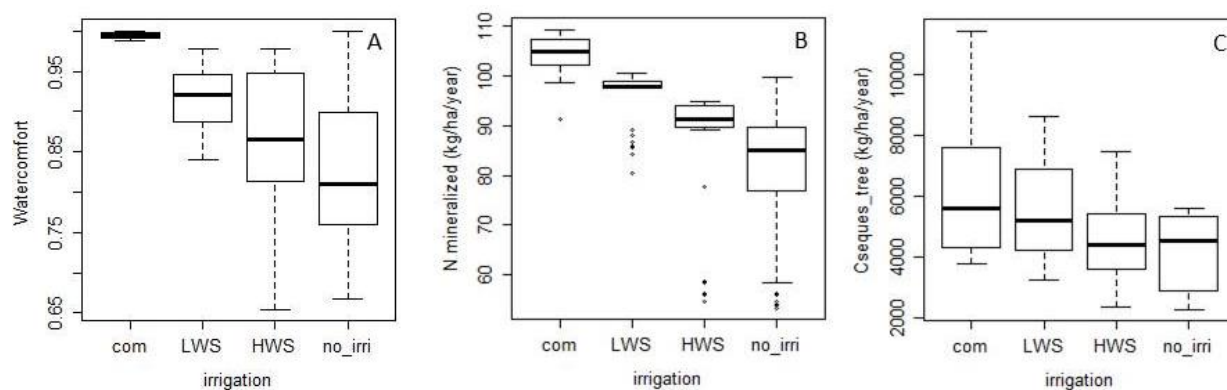


Figure 5.3: Boxplots of the effect of irrigation modalities on water comfort (A), N mineralized (B) and carbon sequestered in tree's annual organs (C). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4

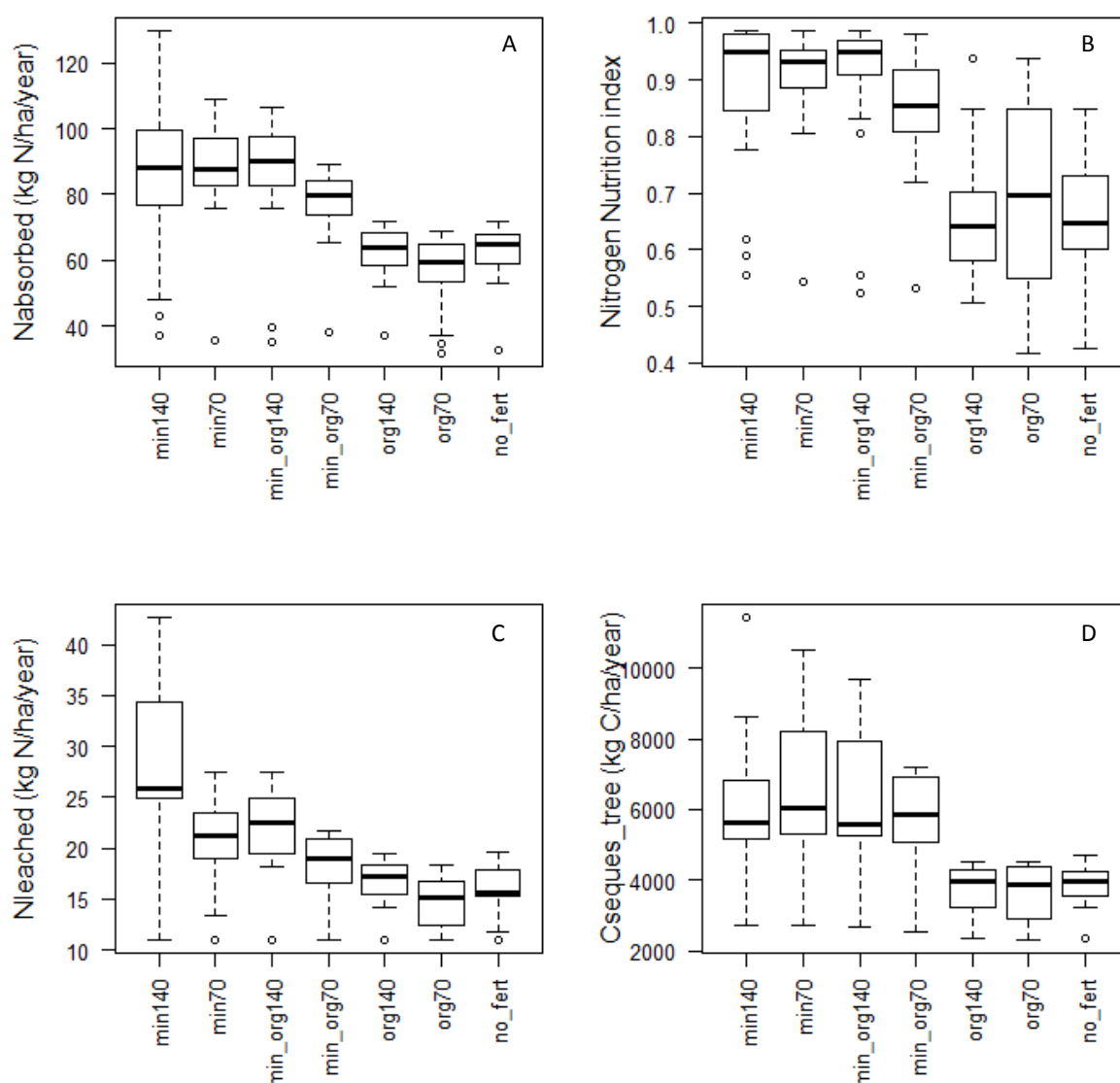


Figure 5.4: Boxplots of the effect of fertilizer type and quantity on nitrogen absorption (A), nitrogen nutrition index (B), nitrate leaching (C) and carbon sequestered in tree's annual organs (D). The significance of the labels is given Tables 5.2 and 5.4.

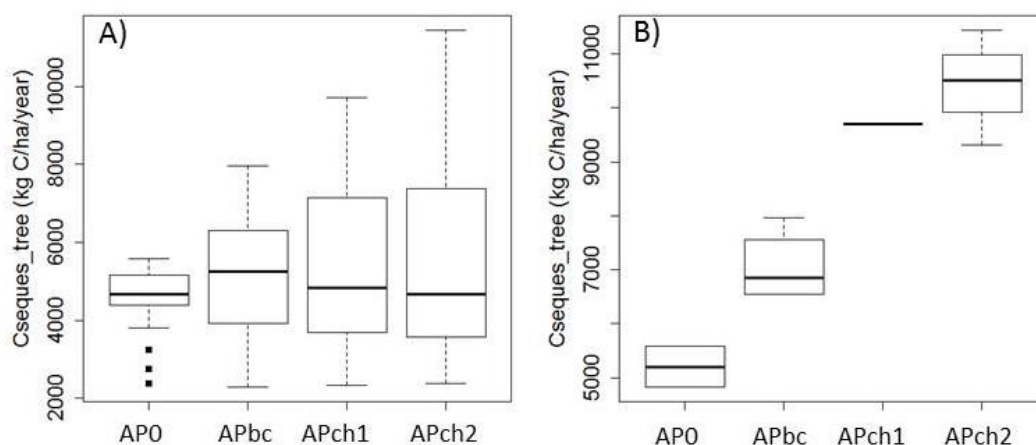


Figure 5.5: Boxplots of the impact of rosy apple aphid control on carbon sequestrated in tree's annual organs for all cropping systems (A) and for intensively fertilized (i.e. min140 and/or min70) and irrigated (i.e. com) cropping systems (B). The significance of the labels is given in Tables 5.2 and 5.4

3.2. Ecosystem services patterns of correlations are explained by ecosystem functions

In the second PCAIV, ecosystem functions accounted for an important part of the ecosystem services variation ($R^2=88.1$, $P<0.01$) (Fig. 5.6A and B). Components 1, 2 and 3 explained 95.2% of the total variance. Ecosystem functions and ecosystem services were, as in the first PCAIV, heterogeneously distributed on the PCAIV projection planes.

3.2.1 Synergies

C sequestration, yield and fruit mass were positively correlated (Fig. 5.6B). According to the PCAIV, these services were linked to carbon sequestration in tree's annual organs, most of which allocated to fruits, nitrogen nutrition index and nitrogen absorption (Fig. 5.6A). More specifically, yield and carbon sequestration were multiplied by more than five as nitrogen absorption increased from 20 to 120 kg N/ha/year (Fig. 5.8). Water comfort was not linked to yield or fresh fruit mass.

According to the PCAIV results, drainage and mean soil humidity were positively correlated probably due to their strong linkage with water comfort function (Fig. 5.6A and B). Water-related services have a specific status because they can impact other ecosystem functions. In fact, water in soil impacts nitrogen mineralization by stimulating microbial activity, while it also contributes to the increase of the tree's water comfort level.

The service indicators meanNO3 and varNorg were correlated, without any clear explanation in terms of underlying functions, and probably rather due to the type of soil.

3.2.2 Conflicts

Carbon sequestration, yield and fruit mass were in conflict with the prevention of nitrogen denitrification or of nitrate leaching due to two positively correlated ecosystem functions: nitrogen absorption and nitrate leaching (Figs. 5.6 and 5.8).

The prevention of nitrate leaching was logically negatively correlated to the soil nitrate concentration (Fig. 5.6 A and B). More interestingly, organic nitrogen variation was negatively correlated to water related services (mean soil humidity and drainage; Fig. 5.6B). This negative correlation can be explained by a key-function: nitrogen mineralization (Fig. 5.6A). Water increases nitrogen mineralization values, whereas nitrogen organization (i.e. the process which transforms mineral nitrogen into more stable forms) appears as a more stable process, which in addition is mostly driven by the C/N ration of soil fresh organic matter. Furthermore, on the PCAIV plane, carbon sequestration in soil was at the exact opposite of nitrogen mineralization (Fig. 5.6A) and explained the delivery of organic nitrogen variation, as carbon and nitrogen sequestration proceed together.

Pest related variables (i.e. fruit and leaf area loss for ecosystem functions, TFI reduction for response variables) were accounted for on the third component (Fig. 5.7A and B). Yield was negatively correlated to TFI reduction. Fruit and leaf area losses were positively correlated to TFI reduction, suggesting that in the conditions of the simulations, a reduction of pesticide use was hardly compatible with efficient pest control.

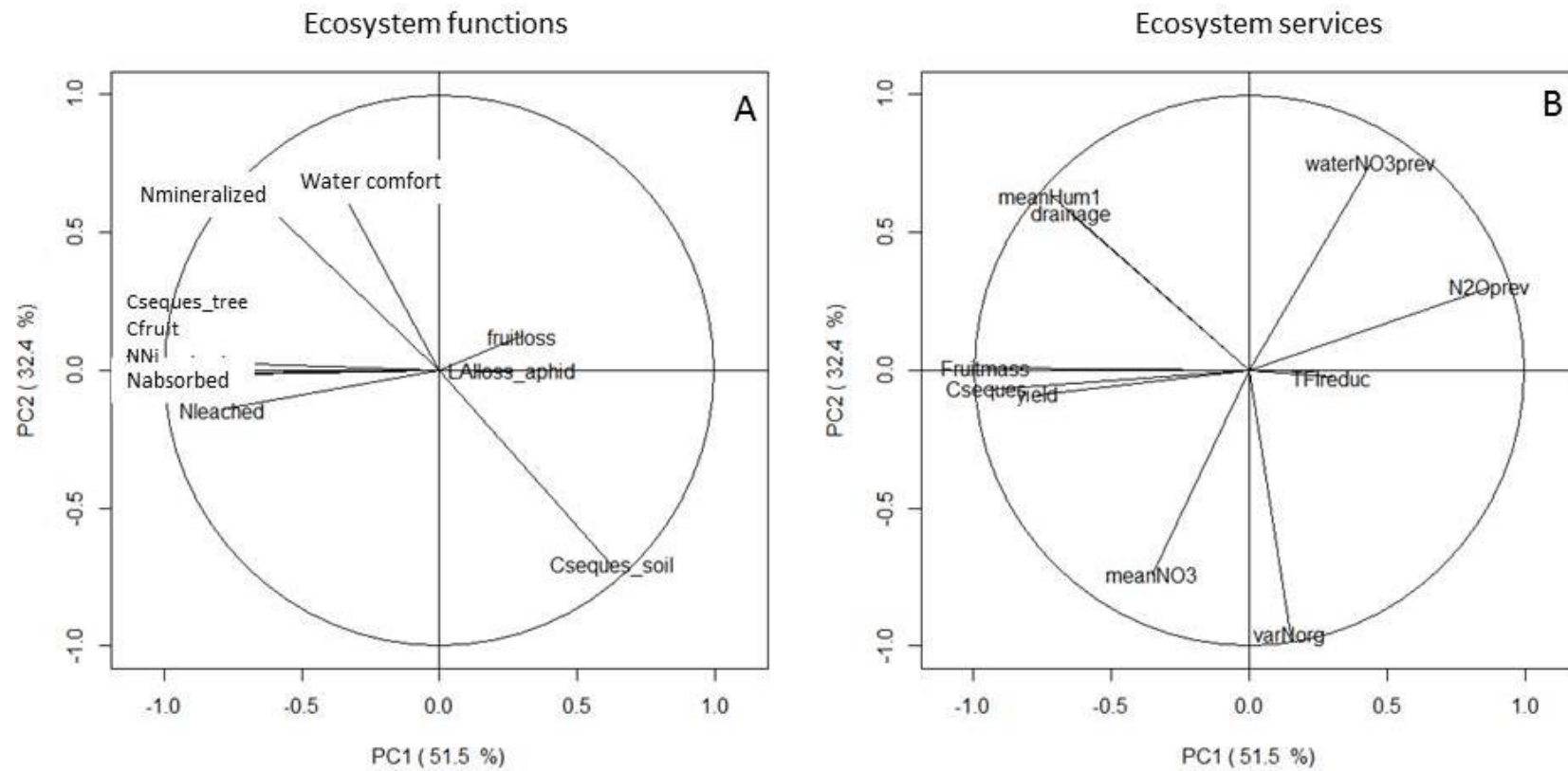


Figure 5.6: Correlation plots of explanatory variables, i.e. ecosystem functions (A), and of response variables, i.e. ecosystem services (B) with respect to the first two PCAIV components (PC1 and PC2). The significance of the labels is given in Tables 5.1 and 5.2.

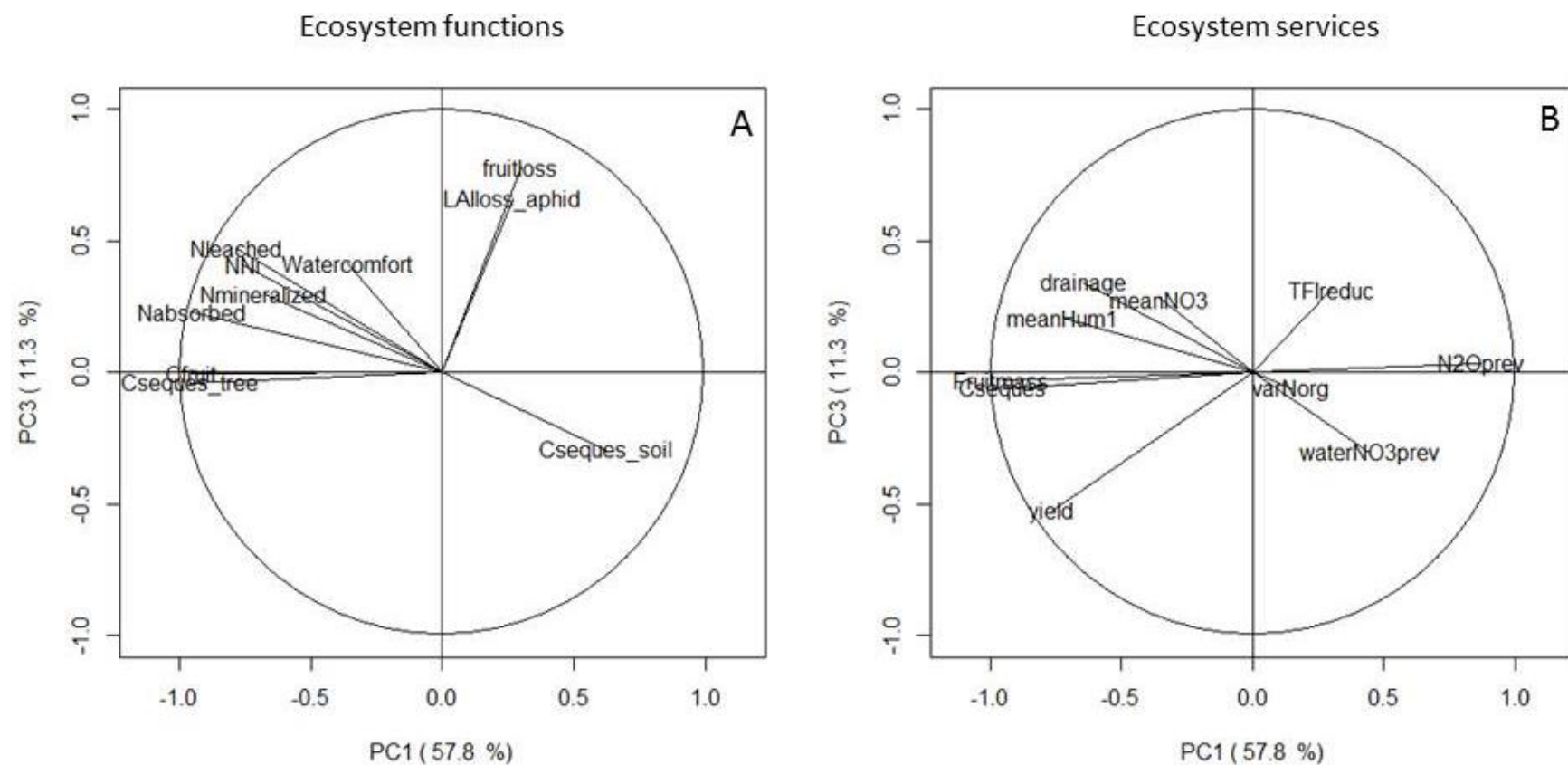


Figure 5.7: Correlation plots of explanatory variables, (i.e. ecosystem functions (A), and of response variables, (i.e. ecosystem services (B) with respect to the first and third PCAIV components (PC1 and PC3). The significance of the labels is given in Tables 5.1 and 5.2.

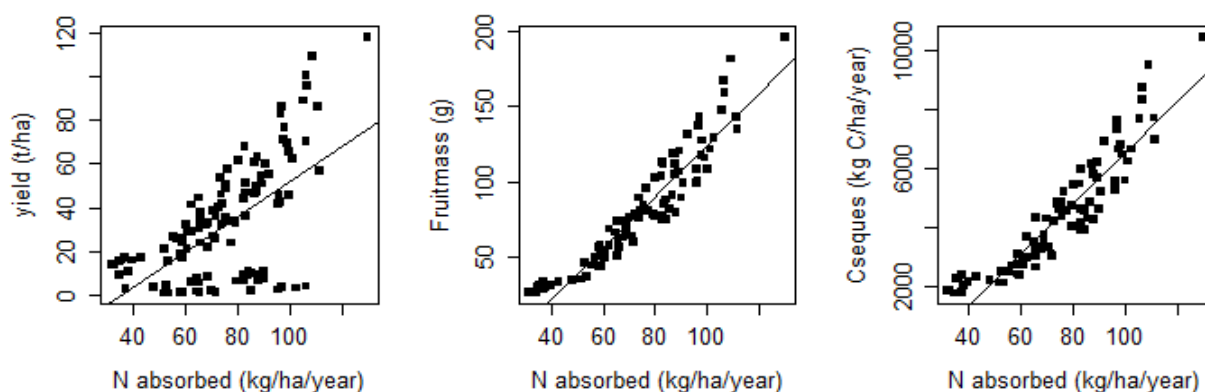


Figure 5.8: Relationships between nitrogen absorption and yield, fruit mass and carbon sequestration. Lines represent linear regressions.

3.3 Typology of apple orchard cropping systems: the conflict between marketed and non-marketed ecosystem services as a backbone

Four groups were defined based on the AHC of the 150 cropping systems coordinates on the two first components of the second PCAIV (i.e. linking ecosystem functions to services). The four groups were well-distributed, mostly corresponding to the conflict between yield, fruit mass and C sequestration on the one hand and the prevention of nitrogen denitrification and nitrate leaching on the other hand (Fig. 5.9A). A detailed description of the agricultural practices in each group is given in Table 5.5. The ecosystem service profiles of the four groups are described in Table 5.6 and on the radar plots of Figure 5.9B. Globally, the average of normalized values of all ecosystem services taken together was the highest for group 1 (0.599) and the lowest for group 4 (0.480), groups 2 and 3 being intermediate (0.555 and 0.529 respectively).

The first group included 14 cropping systems. High leaching reduced the ability to maintain water quality. Irrigation was conducted in hydrological comfort: it created higher mineralization, thus lower organic nitrogen variation (i.e. limited long term nitrogen availability). Codling moth and rosy apple aphid control was mostly dealt with chemical pesticides, which limited the reduction of TFI.

Group 2 included 28 cropping systems. A part of the cropping systems used 140 kg N/ha/year of mineral fertilizers and hydrological comfort for irrigation. This created high mean nitrate concentrations in soil. However, as some of the group's cropping systems used organo-mineral fertilization and had a low water stress, organic nitrogen and the prevention of nitrogen denitrification increased compared to group 1, while yield, C sequestration and fruit mass decreased.

TFI remained high in group 2, despite the use of exclusion nets against the codling moth and biocontrol against the rosy apple aphid, because of a chemical control of apple scab.

Group 3 included 37 cropping systems which were close to the center of the PCAIV projection plane, thus corresponding to the minimal conflict between all ecosystem services. Fertilization was mineral or organo-mineral in this group, with a balanced distribution between the four modalities. This may be an explanation for higher prevention of nitrogen denitrification compared to the previous groups. The mean nitrate concentration was surprisingly high in these cropping systems, which could be explained by the reduced production of annual organs and a resulting decrease in nitrogen absorption. That could be the reason why nitrate leaching was maintained relatively high (39.6 mg $\text{NO}_3\text{-N/L}$ drained water). Most of these cropping systems were either not irrigated or submitted to conditions of high water stress. Compared to the previous groups, this could have contributed to decrease nitrogen denitrification but also yield, fruit mass and C sequestration. Yield was also impacted by the predominant 'no control' modality for codling moth and rosy apple aphid control. However it did not greatly reduce TFI compared to groups 1 and 2, as for apple scab, chemical protection was mainly used, requiring multiple fungicide applications.

Group 4 included 71 more unconventional cropping systems that globally increased either organic nitrogen variation or nitrogen denitrification and nitrate leaching prevention services. Water stress prevailed in these cropping systems, either by lower irrigation management inputs, or due to cover nets for apple scab control, (which prevented rainfall) , or with the combination of these two practices (represented in the lower right part of Fig. 5.9 A). Despite the low level of irrigation, a significant decrease of organic nitrogen (varNorg) was observed. TFI was a little lower than for groups 1 and 2 because of the use of exclusion nets against codling moth and of rain proof cover against apple scab.

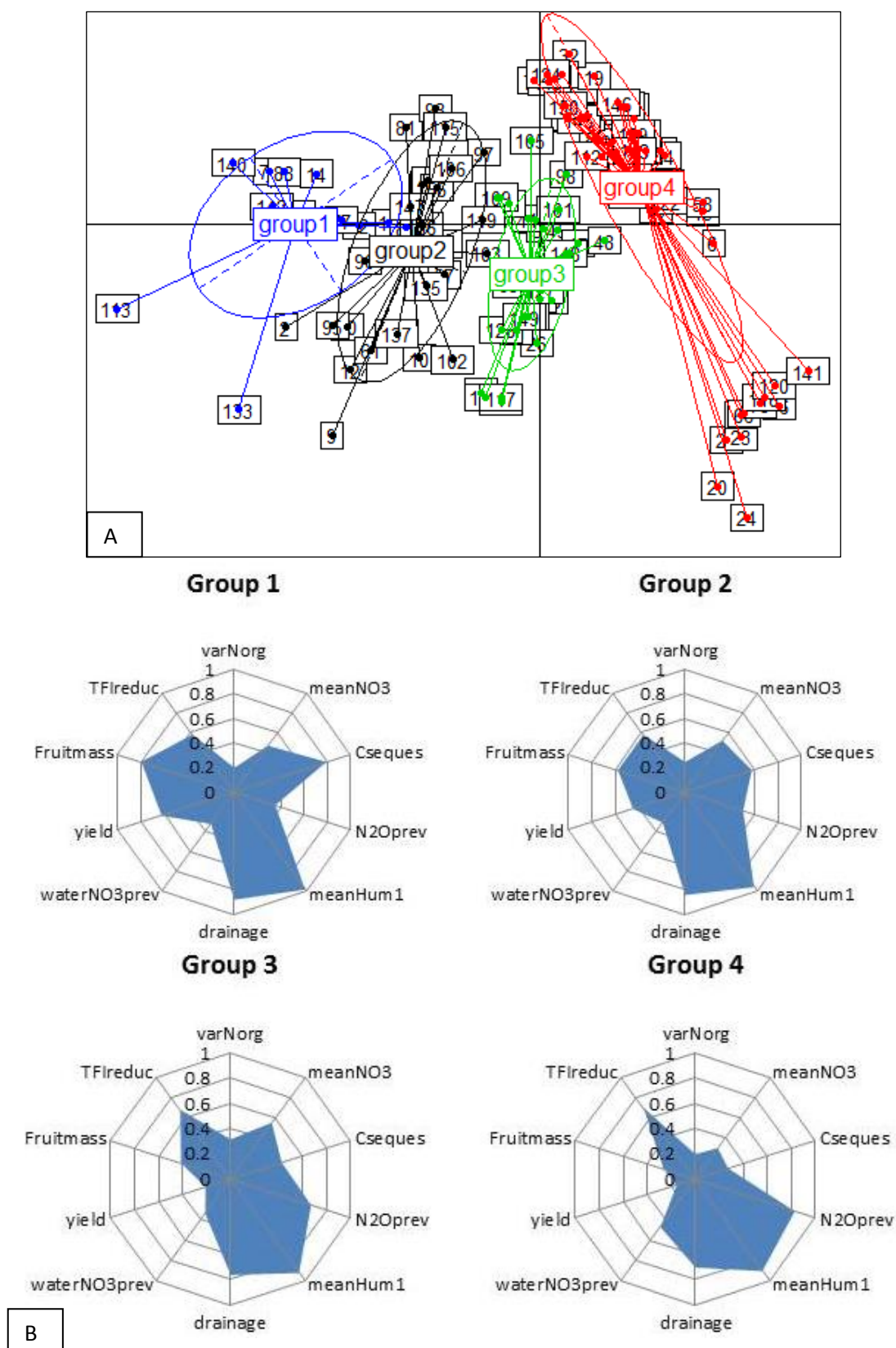


Figure 5.9 : Four groups of apple orchard cropping systems projected on the two first components of the PCAIV (A) and their profiles of ecosystem services on radar plots (B). The significance of the labels is given in Table 5.1.

Table 5.5 : Absolute frequencies of the modalities of the agricultural practices within the 4 groups of virtual orchard cropping systems. Values in bold indicate the dominant practice used in each group. The significance of the labels is given in Table 5.4.

		Group 1	Group 2	Group 3	Group4
Fertization	min140	0.14	0.32	0.24	0.04
	min70	0.43	0.18	0.27	0.01
	min_org140	0.43	0.18	0.27	0.03
	min_org70	0.00	0.32	0.22	0.01
	org140	0.00	0.00	0.00	0.23
	org70	0.00	0.00	0.00	0.31
	no_ferti	0.00	0.00	0.00	0.37
Irrigation	com	0.57	0.36	0.14	0.20
	LWS	0.43	0.36	0.14	0.23
	HWS	0.00	0.29	0.24	0.28
	no_irri	0.00	0.00	0.49	0.30
Codling moth control	CMnet	0.29	0.50	0.35	0.35
	CMch	0.50	0.25	0.16	0.25
	CMbc	0.00	0.18	0.14	0.15
	CM0	0.21	0.07	0.35	0.24
Rosy apple aphid control	APch1	0.43	0.32	0.14	0.28
	APch2	0.57	0.21	0.11	0.25
	APbc	0.00	0.46	0.30	0.23
	AP0	0.00	0.00	0.46	0.24
Apple scab control	SCch	0.21	0.32	0.27	0.14
	SCbc	0.07	0.29	0.27	0.23
	SC0	0.21	0.07	0.08	0.20
	SCvar	0.50	0.21	0.19	0.11
	SCcov	0.00	0.11	0.19	0.32

Table 5.6 : Mean values (non-normalized) of ecosystem service indicators for each of the 4 groups of cropping systems. The significance and units of the labels is given in Table 5.1.

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
Number of cropping systems	14	28	37	71
varNorg	-83.72 ±1.88	-78.66±2.27	-71.40±2.13	-83.67±2.46
meanNO3	13.09 ±0.66	14.54±0.93	15.51±0.85	8.51±0.54
Cseques	8263±241	5993±103	4444±46	2860±68
N2Oprev	-0.87±0.03	-0.67±0.04	-0.44±0.03	-0.23±0.17
meanHum1	20.77±0.09	20.26±0.08	19.45±0.09	19.08±3.55
drainage	145±2.47	138±3.17	125±2.98	116±0.49
waterNO3prev	-40.70±1.73	-41.49±2.03	-39.64±1.03	-31.81±1.43
yield	73.46±10.60	52.58±3.27	24.64±2.90	18.24±1.43
Fruitmass	157±4.72	113±2.04	81±0.77	52±1.66
TFIreduc	-8±1.62	-8±1.08	-6±0.94	-6±0.64

Five cropping systems optimized the trade-off between marketed and non-marketed services among the non-dominated cropping systems of the Pareto front (Fig. 5.10). The shortest distance from a theoretical ideal solution was attributed to two cropping systems that used mineral fertilization with 70 kg N/ha/year or organo-mineral fertilization with 140 kg N/ha/year, comfort irrigation, chemical control for codling moth and rosy apple aphid and apple scab resistant cultivar. The 3 other cropping systems with a short distance to the theoretical ideal solution, used organo-mineral fertilization with 140 kg N/ha/year and exclusion nets against codling moth. All cropping systems belonged to group 1, as shown on Appendix 5.B.

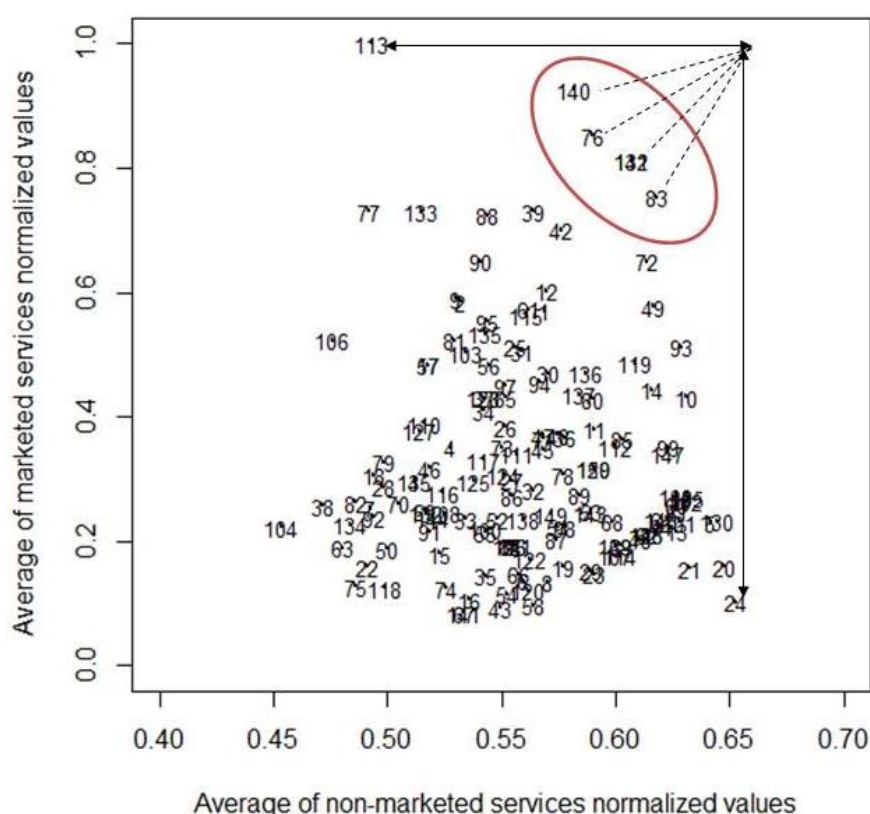


Figure 5.10: Trade-offs between marketed ecosystem services, i.e. yield and fruit mass, and non-marketed services, i.e. soil nitrogen availability, climate regulation, hydrological cycle maintenance and regulation and reduction of environmental nuisance due to pesticides. Each number represents a cropping system. The double-headed cropping systems represent the highest performances for marketed services and for non-marketed services, respectively. Red-circled cropping systems are those optimizing the trade-off between marketed and non-marketed services. Dotted lines are the distances from a theoretical ideal solution.

4 Discussion and conclusions

5.1. Main achievements

The aim of this study was to apply a specific approach based on model simulations in order to assess multiple ecosystem relationships. This approach focuses on the decomposition of these services into underlying ecosystem functions, which are themselves impacted by agricultural practices. We designed a significant range of situations by selecting randomly 150 cropping systems among a combination of five important orchard management levers. In our case, it seemed that fertilization was the most impacting lever, as most of the considered ecosystem services were linked to nitrogen. In the range of studied cropping systems noticeable synergies were found between yield, fruit mass and carbon sequestration. The contribution of carbon allocation to fruit, regarding the global carbon sequestration, was outstanding, and this is clearly a specificity of orchards compared to other ecosystems. These services were in conflict with the prevention of nitrogen denitrification and leaching. Nitrogen absorption, which is impacted by fertilization and irrigation, was a major driver of these relationships. Water supply appeared to impact ecosystem functions such as nitrogen mineralization (De Neve and Hofman 2002), and the resulting services such as organic nitrogen variation. The functions related to pest and disease control only impacted yield, hence they were poorly represented on the second PCAIV planes.

The five non-dominated cropping systems optimizing multiple ecosystem services were obtained using two very simple criteria. This way, it was possible to identify cropping systems optimizing both marketed and non-marketed services. However, these criteria were calculated without considering the same weight for each service. The production criteria were the average yield and fruit mass values, i.e. only two service indicators thus weighing 25% each, whereas the environmental criteria considered 9 service indicators, thus weighing 5.5% each. That could explain why all non-dominated cropping services with the closest distance to theoretical solution belonged to Group 1. Each service weight should be discussed with experts in order to plan more utterly the optimization of multiple ecosystem services.

5.2. Methodological limits

5.2.1. Model limits

Three important limits concerning the simulation of the nitrogen cycle with the STICS model can be emphasized.

First, as we simulated the crop's functioning during a single year and without considering cover crops in the interrows, organic nitrogen variation remained negative. On a long term perspective, fresh organic matter returned to soil from cover crops or root residues could significantly increase the soil organic nitrogen stock from one year to another (Strullu et al. 2014). The relationship between water regulation and organic nitrogen variation, which in our case was conflicting, could therefore change with multi-year simulations. Second, nitrogen reserve remobilization from the structural parts of the tree was not considered, and this increased the dependence of fruit production and of C sequestration in the tree's annual organs to nitrogen absorption. Finally, simulations were operated on bare soil conditions, which may have increased nitrogen denitrification and leaching values. Further research is needed on the functioning of apple orchards cover crops in order to adapt to this case the intercropping module of STICS used for annual crops (Brisson et al. 2004).

The IPSIM-Pommier model is based on a weighting system of factors effects on pest injury. In the present state of knowledge and for the high pest pressure used in the simulations, chemical and integrated pest control had a much more important effect on pest and disease control than biological control.

Another limit was that we converted qualitative outputs of the IPSIM-Pommier model into quantitative outputs, considering a large set of situations, encompassing conventional up to organic systems. One should explore the modalities of this conversion according to the markets and the sectors to which the fruits or services are aimed at. For example, the translation of "severe fruit loss" into a percentage (Tab. 5.3) is not the same for the organic sector and for a more conventional one.

Eventually, the coupling of the two models was limited as, on the one hand, STICS does not consider fully plant's biotic stresses and, on the other hand, IPSIM-Pommier is not a dynamic model, which precludes the possibility of a dynamic coupling between the soil-plant and the pest model. A new generation of models is necessary to overcome these limits.

5.2.2. Which practices are the most relevant to study synergies and conflicts between ecosystem services?

In this study, pest control practices impacted a limited number of ecosystem functions and did not drive synergies or conflicts between services. In studies of multiple services in agroecosystems, agricultural practices should be selected according to their capacity of impacting a large range of ecosystem functions. An interesting example is the use of cover crops in orchard inter-rows, which affects ecosystem functions of the nitrogen cycle (e.g. competition for nitrogen between trees and cover crops or on the contrary, increase of nitrogen available for trees when legumes are used), the water cycle (e.g. competition for water resource or better infiltration), the carbon cycle (e.g. decomposition of roots) and pest regulation by offering food and refuge to natural predators (Wyss 1995; Schipanski et al. 2014).

4.3 Advantages of our approach

Our approach followed the agricultural management – ecosystem functions – ecosystem services cascade model adapted from Haines-Young and Potschin (2009). By exploring a large range of apple orchard cropping systems, we identified the ones able to increase the provision of multiple services. In our study, three innovative key features stand out, partly answering to the criticisms made by Seppelt et al. (2011) to the current research in ecosystem services analysis.

The first feature was to analyze synergies and conflicts in multiple ecosystem services. Many studies on perennial crops have focused on two-way service relationship, considering a production service and a regulation one: for example, grapevine yield and fungal disease regulation (Guilpart 2014), grapevine yield and runoff mitigation (Ripoche et al. 2011) or fruit production and biodiversity conservation (Baumgärtner and Bieri 2006). Studies of trade-offs among multiple ecosystem services, including provision services and a whole array of regulating services, are still scarce. They include the comparison of crop systems using models or data from long-term experimental trials (Robertson et al. 2009; Kragt and Robertson 2014; Syswerda and Robertson 2014). Unlike these three studies on multiple ecosystem services, our study focused on a particular agroecosystem - the apple orchard – enabling an in-depth comparison of different apple orchard cropping system types.

The second feature was to relate ecosystem functions to ecosystem service indicators using models. Models enable to describe and quantify the relationships between functions and between functions and services, which are non-linear and time variant. In this study, they provided a clear picture of

ecosystem services interdependency based on feedback loops and interactions between ecosystem functions, as already demonstrated with the APSIM model in Kragt and Robertson (2014).

The third and last feature was the use of a large range of cropping system situations. This enabled us to connect types of cropping systems and profiles of ecosystem services, as well as to identify cropping systems providing good trade-offs between marketed and non-marketed ecosystem services. Rapidel et al. (2015) stressed the importance of making farmers aware of the possibilities of combining the best sets of practices to provide the desired combinations of ecosystem services. The space of possibilities in terms of cropping systems could be expanded and its exploration could be facilitated by using multi-objective optimization procedures (Ould-Sidi and Lescourret 2011; Grechi et al. 2012). With this respect, the question of trade-offs is central. It has been considered in other ecosystem services studies (Nelson et al. 2008; Kragt and Robertson 2014; Rapidel et al. 2015) and is often based on a Pareto-optimal ranking procedure (Groot and Rossing 2011; Sanon et al. 2012; Seppelt et al. 2013).

Eventually, our approach could contribute to the design of cropping systems providing acceptable trade-offs between multiple ecosystem services in orchards. In this regard, fruit growers are the main decision makers and thus the main designers of cropping systems. However, production costs, regulations, incentives and penalties have a strong impact on this design and they are decided by other stakeholders. Market-based information should be mobilized to seek trade-offs (Sagoff 2011). More generally, farmers represent only one group of stakeholders producing or benefiting from ecosystem services in agricultural territories, and collective management is the key to achieving acceptable trade-offs between multiple ecosystem services (Lescourret et al. 2015). In the case of orchards, this will require to broaden the study scale and to consider the social processes and organizations at play in the areas of fruit production.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

1. La complexité du fonctionnement d'un verger de pommiers décomposée sous l'angle des services écosystémiques

1.1. Originalité de la démarche d'analyse et résultats saillants

L'objectif principal de cette thèse a été d'analyser les conflits et synergies entre cinq services écosystémiques en vergers de pommiers : la production de fruits en quantité et qualité, la régulation du climat par l'atténuation de l'émission des gaz à effet de serre, la disponibilité en azote dans le sol, la régulation du cycle de l'eau et le contrôle des bioagresseurs. Nous avons également considéré la prévention de nuisances environnementales dues aux pesticides. Pour analyser ces liens, nous avons suivi une approche progressive en tenant compte non seulement des interactions entre les fonctions écosystémiques en amont de ces services, mais aussi de l'impact de pratiques agricoles et de conditions pédoclimatiques sur ces fonctions et par conséquent sur les liens entre services. Cette analyse a été réalisée sous différentes gammes de situations choisies.

L'originalité de ce travail de thèse réside d'abord dans le choix de l'agroécosystème cible. En effet, pour les espèces pérennes, on compte plusieurs analyses de services écosystémiques multiples en systèmes forestiers (Krieger 2001; García-Nieto et al. 2013; Maes et al. 2016) et agroforestiers (Noponen et al. 2013; Tsonkova et al. 2014; Fagerholm et al. 2016), mais très peu en cultures pérennes. Ces dernières concernent le plus souvent la viticulture et ne traitent en général que de deux services, le plus souvent en conflit (Ripoche et al. 2011; Guilpart 2014). Nous avons choisi la culture de pommier, qui a, en particulier en France, une importance capitale à cause de son poids économique, et qui est emblématique du double enjeu de maintien de la productivité agricole et de préservation des ressources naturelles.

L'évaluation de la durabilité des systèmes de culture repose souvent sur la quantification par des indicateurs d'un ensemble de performances agronomiques, économiques et environnementales (Bockstaller et al. 2008), puis sur une analyse à l'aide d'outils intégratifs d'évaluation comme MASC (Sadok et al. 2009) ou DEXIPM (Pelzer et al. 2012). Les processus écologiques impliqués dans ces performances ne sont cependant pas considérés. Aussi, la nouveauté apportée par ce travail de thèse est de décomposer le fonctionnement du verger de pommiers pour analyser l'interdépendance des processus impliqués dans la distribution de services écosystémiques multiples, ces derniers pouvant être considérés comme des performances de durabilité du verger.

Une autre particularité de ce travail de thèse est l'approche utilisée pour analyser les services. La problématique, en plus du large choix de services, nous a amené à travailler de manière intégrative, en utilisant des modèles. Cette approche permet de répondre en partie aux questions posées dans les deux études de Seppelt et al. (2012, 2011), à propos de l'analyse des services: celle de leur quantification et celle de l'utilisation d'une démarche progressive, voire standardisée, pour les analyser.

Nous avons réalisé une première analyse des services écosystémiques sur une gamme de situations constituée de 9 systèmes de culture de pommiers réels, pour lesquels la dynamique de croissance de l'arbre ainsi que les interactions avec le sol étaient mesurées sur le terrain. Ces mesures nous ont permis de paramétrer et tester les modèles STICS et IPSIM sur pommier. Les corrélations entre valeurs d'indicateurs de services ont d'abord été analysées, puis celles entre fonctions et services impactés par des pratiques et des conditions pédoclimatiques. Plusieurs liens entre services écosystémiques ont été identifiés, notamment des conflits entre la prévention de la dénitrification ou la lixiviation de l'azote et la disponibilité de l'azote dans le sol à court terme, ainsi que des synergies entre le stockage d'azote dans le sol et la prévention de la dénitrification ou la lixiviation de l'azote. La comparaison de profils de services entre systèmes a mis en évidence l'impact des pratiques culturales sur le bouquet de services étudié. Nous avons montré que sur un même site, une forte densité de plantation augmentait la production de fruits et la séquestration du carbone. La fertilisation organique diminue la production de fruits via un stress azoté mais prévient également le lessivage de l'azote. Ces analyses mettent en avant les transformations majeures au sein des cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et de l'eau en soulignant l'importance de l'impact des conditions pédologiques et climatiques, notamment sur les services liés à l'eau et à la disponibilité de l'azote dans le sol.

Une deuxième gamme de situations a été analysée, cette fois en fixant les conditions pédoclimatiques. Il s'agissait de 150 systèmes de culture de pommiers fictifs. Les résultats de cette analyse ont permis de conforter les premiers résultats observés sur les 9 systèmes réels en termes d'impacts des pratiques culturales. L'utilisation du modèle IPSIM-Pommier dans les simulations de ces systèmes a ajouté une dimension biotique, en évaluant le contrôle des bioagresseurs. Nous avons noté trois conflits majeurs entre les services écosystémiques étudiés. Le rendement, la séquestration du carbone (fortement déterminée par le carbone dans les fruits) et le poids d'un fruit frais sont en conflit avec la prévention de la dénitrification de l'azote. La concentration en nitrate dans le sol est en conflit avec la prévention du lessivage de l'azote, de même que la variation d'azote organique avec l'état de l'eau dans le sol et le drainage. Chacun de ces conflits est expliqué par l'impact des

pratiques sur les fonctions en amont des services. Par exemple, une réduction de l'irrigation occasionne un fort stress hydrique et limite d'une part la production de fruits mais aussi la disponibilité de l'azote dans le sol (en lien avec le type de sol) via, entre autres, une diminution potentielle de la minéralisation de l'azote organique dans le sol. Les systèmes fournissant les compromis les plus favorables entre services ont été identifiés parmi les 150 systèmes fictifs: il s'agit notamment de systèmes à fertilisation minérale ou organo-minérale, dont l'apport en azote ne dépasse pas 70 kg N/ha, bien irrigués et protégés par des leviers non-chimiques comme le filet 'Altcarpo' ou des variétés résistantes à la tavelure (voir Section 3.2).

1.2. Identification des manques de connaissances sur le fonctionnement du verger de pommiers

Dans le chapitre 1, nous avons identifié des manques de connaissances scientifiques sur certaines fonctions et sur la manière dont elles sont impactées par des pratiques agricoles. Il s'agit d'abord des besoins en azote du pommier, de leur cinétique et de la part des différents organes dans ces besoins. Pour le pommier, la croissance végétative et la croissance des fruits (qui jouent progressivement un rôle de stockage) se font de manière simultanée et sur l'ensemble du cycle. Or, le modèle théorique de dilution de l'azote de Lemaire & Gastal (1997) – qui est mobilisé dans les formalismes du modèle STICS utilisé dans ce travail de thèse - suppose que la demande en azote de la plante est commandée essentiellement par la croissance des tiges et des feuilles (tissus métaboliques et structuraux) et ne tient pas compte d'organes de stockage comme les fruits, qui impacteraient la dilution de l'azote dans la biomasse (Hoogmoed and Sadras 2016).

Le système racinaire du pommier, qui est important pour l'absorption d'eau et de minéraux, est également un sujet de recherche à approfondir, étant donné qu'il fait le lien entre les compartiments du sol et de la plante. Il n'existe que peu d'études sur le sujet (Ma et al. 2013), même si on trouve quelques travaux concernant l'impact de certaines pratiques comme l'irrigation sur le système racinaire (Sokalska et al. 2009) ou le choix du porte-greffe sur la croissance de l'arbre et la qualité du fruit (Fallahi and Mohan 2000).

Même si de nombreuses recherches mettent en évidence l'intérêt d'augmenter la biodiversité à différentes échelles spatiales pour contrôler les bioagresseurs (Rusch et al. 2010; Simon et al. 2010; Veres et al. 2013), il existe actuellement peu d'indicateurs simples d'utilisation et opérationnels pour quantifier le service de régulation des bioagresseurs. Certaines méthodes comme l'utilisation d'œufs sentinelles dans le cas du carpocapse apparaissent prometteuses pour évaluer les taux de prédation

ou de parasitisme (Monteiro et al. 2013), mais des travaux sont encore nécessaires pour préciser son intérêt opérationnel.

Enfin, c'est aussi la difficulté de mise en œuvre de certaines méthodes de mesure, en lien avec le caractère pérenne des arbres, qui pénalise la connaissance du fonctionnement du verger de pommiers. Pour évaluer la séquestration du carbone dans l'arbre par exemple, l'arrachage des arbres est nécessaire pour mesurer la biomasse et son contenu en carbone. Les mesures de dénitrification ou de lessivage des nitrates demandent une très bonne maîtrise des techniques, surtout lorsqu'il s'agit de mesurer des flux à différentes échelles (variabilité spatiale et temporelle, transformation en valeur cumulée par hectare, etc.)(Groffman et al. 2006).

1.3. Perspectives d'évolution du cadre d'analyse utilisé dans ce travail de thèse

1.3.1. La question de l'échelle d'espace et de temps

Il est important de bien définir l'échelle de temps et d'espace dans laquelle on se place pour l'analyse des liens entre services (Rodríguez et al. 2006), sans quoi ces liens peuvent s'avérer inexistantes, voire même opposés. Par exemple, la régulation des bioagresseurs est impactée par une gamme de pratiques de protection allant de la lutte chimique au contrôle par les ennemis naturels. Ces deux pratiques nécessitent une gestion à des échelles spatiales et temporelles très différentes. La lutte chimique a lieu sur la parcelle, pour une campagne culturale donnée, à des moments précis définis en fonction de la présence ou du risque de présence d'un bioagresseur. Le contrôle par les ennemis naturels demande des actions à raisonner sur le long terme et une prise en compte de l'échelle du paysage (Simon et al. 2010; Monteiro et al. 2013; Vasseur et al. 2013).

Concernant l'échelle de temps, la séquestration du carbone dans un verger de pommier ne prend certainement toute son importance que lorsqu'elle est considérée sur plusieurs années, vu le caractère pérenne de la culture. Au niveau du sol, les valeurs de la variation d'azote organique simulées par STICS à l'échelle de l'année sont négatives sans doute parce que les restitutions organiques en provenance des arbres (feuilles et bois de taille) n'ont pas le temps d'être dégradées et incorporées aux stocks du sol. Qu'en est-il lorsqu'on considère l'échelle multiannuelle ? Le taux de variation d'éléments organiques du sol a été mesuré sur le site de Gotheron, entre 2005 (date de plantation des vergers) et 2015, et sur le site de La Pugère, entre 2009 et 2014. On a observé globalement à Gotheron une forte augmentation du carbone organique et de l'azote total du sol (l'azote minéral étant négligeable par rapport à l'azote organique) (Tab. 6.1). Cette augmentation

représente plus de la moitié de la valeur initiale, pour le système conduit en agriculture biologique. En revanche, à La Pugère, après 5 années consécutives, les taux de variation sont moins élevés et parfois négatifs. Sur ce dernier site, les faibles taux de variations peuvent être liés aux valeurs initiales assez élevées de carbone et d'azote, qui peuvent être perdues par minéralisation, et nécessiteraient d'être compensées par des restitutions importantes de matière organique fraîche. De plus, l'ancienneté de l'essai est encore faible par rapport à ce type de mesures et à leur variabilité. Une nouvelle série d'analyses, à réaliser dans 2 ou 3 ans, semble nécessaire pour conforter l'interprétation. Sur le dispositif de Gotheron, les augmentations de carbone et d'azote organique sont très importantes, comprises entre 720 kg C/ha/an (système conventionnel) et 1350 kg C/ha/an (système organique). Sur ce dernier système, les résultats peuvent s'expliquer en partie par les apports réguliers de compost (800 kg C/ha/an de compost de ferme apporté en début de chaque année). Ces augmentations s'expliquent aussi par les valeurs initiales faibles et à une masse de terre fine réduite dans ce type de sol caillouteux des terrasses du Rhône, ces deux conditions favorisant une élévation des taux de carbone en réponse aux apports de matière organique fraîche.

Tableau 6.1: taux de variation du carbone organique et de l'azote total à Gotheron entre 2005 et 2015 et à la Pugère entre 2009 et 2014

	C organique		N total	
	Valeur initiale (g/kg)	Taux de variation	Valeur initiale (g/kg)	Taux de variation
Gotheron système biologique (Got_ORG2015)	6.54	84%	0.65	70%
Gotheron, système bas-intrants (Got_LI2015)	9.02	33%	0.88	29%
Gotheron, système conventionnel (Got_CON2015)	9.07	32%	0.89	32%
Pugère, système bas-intrants (Pu_LI2015)	14.60	-10 %	1.70	-14%
Pugère, système bas intrant avec variété résistante à la tavelure (Pu_LISR2015)	11.60	12%	1.42	-5%
Pugère, système conventionnel (Pu_CON2015)	10.10	14%	1.13	24%

STICS simule des valeurs sur une échelle multi-annuelle. Les simulations réalisées dans notre étude se sont limitées, faute de temps, à l'année. Une des suites à donner à ce travail de thèse pourrait être de créer, puis d'analyser à partir de simulations multi-annuelles sous STICS, une base de données

caractérisant différents types de sol de vergers de pommier sur plusieurs années (pour la liste des données voir Tab. 2.3, Chapitre 2).

1.3.2. Prise en compte de l'ensemble de la chaîne de production de pommes

Dans la chaîne de production de pommes, seuls les événements qui se déroulent sur la parcelle ont été considérés dans notre travail. Or certains postes en amont ou en aval sont importants pour les services écosystémiques. L'export des pommes en dehors de la parcelle après récolte est un premier exemple. Zanutelli et al. (2015) montrent à partir de mesures réalisées pendant 3 ans en vergers de pommiers, qu'autant de carbone est exporté en dehors du verger qu'utilisé pour la respiration hétérotrophe dans le sol (respectivement 418 et 466 g C/m²/an), alors qu'uniquement 58 g C/m²/an est stocké dans les parties structurales, soit 1/8 de ce qui est exporté. Le relargage de CO₂ par la fabrication de produits phytosanitaires ou d'engrais et l'utilisation de machines agricoles - sans compter toutes les émissions de CO₂ provoquées par les pratiques de conservation et commercialisation des pommes - sont également des postes à prendre en compte dans l'évaluation du bilan de carbone en verger de pommiers. Les travaux du Ctifl servant de référence pour la base de données AGRIBALYSE développée par l'ADEME (études non publiées), ont montré que la mécanisation pour l'entretien du verger, l'application de pesticides et la production de fertilisants étaient les trois postes émettant les plus grands niveaux de CO₂ sur des vergers de pommier dits « de référence », avec des variétés résistantes ou non à la tavelure (Fig. 6.1). Sur le verger bio, bien que les émissions du poste de production de fertilisants diminuent par rapport aux systèmes de référence grâce à l'utilisation d'engrais organiques, celles du poste de mécanisation pour l'entretien du verger triplent et celles de l'application d'intrants doublent. Pour considérer ces postes supplémentaires d'émissions de CO₂ en amont et en aval du cadre de la parcelle, l'approche par Analyse de Cycle de Vie (ACV) serait très pertinente et tout à fait complémentaire de notre étude (Page et al. 2011; Alaphilippe et al. 2013).

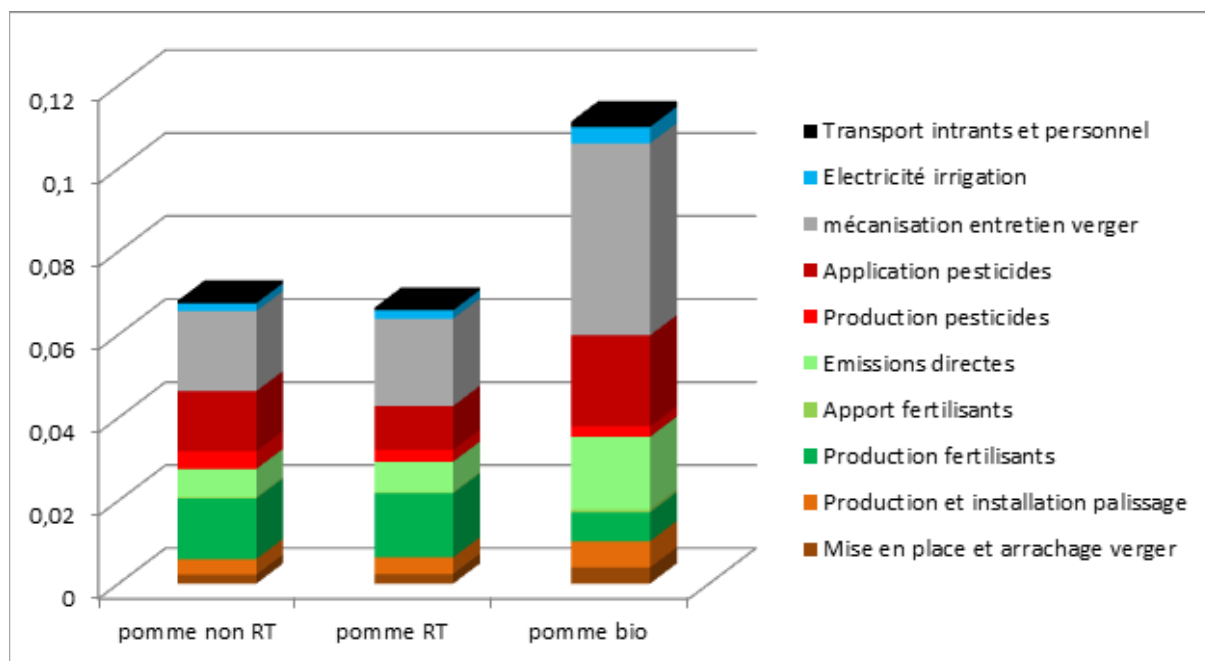


Figure 6.1: Niveaux moyens d'émissions en France calculées pour le verger 'de référence' de pommiers non résistants à la tavelure (pomme non RT), de pommiers résistants à la tavelure (pomme RT) et d'un verger biologique (pomme bio) 'moyen' en France, pour les différents postes d'activité, exprimées en kg eCO₂/kg de pomme, sur l'ensemble du cycle du verger. Les émissions directes (vert clair) correspondent aux émissions de N₂O liées aux apports azotés (source : CTIFL)

1.3.3.L'importance du sol et du climat

L'analyse des liens entre services sur la gamme de situations réelles a permis de souligner l'importance du pédoclimat. Le service de prévention de la dénitrification est en synergie avec la production de fruits. Cette synergie est principalement lié à la gestion de la fertilisation - par l'absorption de l'azote (augmentation de l'indice de nutrition azoté qui augmente le rendement) - et de l'irrigation - par la minéralisation (directement impactée par l'humidité du sol). Mais il est à nuancer avec le type de sol : en effet, les caractéristiques structurales du sol impactent fortement les fonctions écosystémiques étudiées dans ce compartiment. Par exemple, malgré une forte fertilisation minérale, les sols caillouteux de Gotheron ne présentaient pas de dénitrification à cause d'une moindre stagnation de l'eau, contrairement à la Pugère.

D'autre part, on peut s'interroger sur la source de conflit entre la concentration en nitrates des sols et le lessivage des nitrates. Alors que les vergers de la Pugère ont globalement reçu moins d'engrais minéraux que ceux de Gotheron, ils présentent de plus fortes concentrations en nitrates dans l'eau drainée qu'à Gotheron. La minéralisation ne peut pas non plus être en cause car elle est légèrement moins forte à la Pugère qu'à Gotheron. En revanche, la forte intensité des précipitations en automne

pourrait être un facteur explicatif de ce lessivage à la Pugère. Le conflit peut donc être expliqué par le facteur climat sur le site de la Pugère et non pas par une pratique agricole.

2. *Avantages et limites des outils et méthodes utilisés pour analyser les liens entre services*

La démarche utilisée a fait appel à un ensemble d'outils et de méthodes d'analyse qui ont été choisis au fur et à mesure du travail de thèse, permettant ainsi de créer un bon enchaînement entre eux. La critique des outils d'analyse statistique et des indicateurs a déjà été abordée dans les discussions des chapitres de la thèse. Les prochains paragraphes discuteront de trois points plus généraux : le rôle des modèles et leurs limites, l'utilisation de la notion de « système technique » pour l'analyse des services et la représentation de profils de services.

2.1. Les modèles utilisés

2.1.1. Intérêt de la modélisation

Les résultats obtenus pour les variables-clés étudiées avec le modèle STICS sont en cohérence avec les données de la littérature, ce qui conforte notre choix d'utiliser des modèles pour analyser les services multiples. Ainsi, les valeurs de LAI simulées par STICS étaient en accord avec la gamme de valeurs observées par différents auteurs (Palmer et al. 1992; Cheng and Raba 2009; Zanotelli et al. 2013). La dynamique de la biomasse aérienne (fruits, feuilles, tiges) correspondait bien aux valeurs observées sur le terrain pour les 9 systèmes de culture de pommier étudiés ; les rendements simulés se trouvaient également dans la gamme des valeurs trouvées dans la littérature (Robinson et al. 1991a; Peck et al. 2006; Zanotelli et al. 2013), tout comme les quantités d'azote absorbé par le pommier (Nesme et al. 2009). Pour IPSIM-Pommier, les valeurs simulées étaient globalement proches des résultats des 12 systèmes de culture de pommiers étudiés (sites de Gotheron et La Pugère en 2014 et 2015), qui incluaient une large gamme de situations allant d'un verger conduit en agriculture biologique à un verger conventionnel.

Plusieurs études ont montré l'intérêt d'utiliser des modèles pour étudier les relations entre deux services (Ripoche et al. 2011; Meylan et al. 2013) ou pour analyser des services écosystémiques multiples (Kragt and Robertson 2014; Tsonkova et al. 2014). Dans notre étude, la complexité du fonctionnement d'un verger de pommier a pu être appréhendée par l'utilisation de modèles, en

particulier un modèle aussi intégratif que STICS. Ces modèles ont permis de considérer la chaîne liant les trois entités principales de notre étude : les pratiques agricoles et conditions du milieu, les fonctions écosystémiques et les services écosystémiques. Le modèle STICS les a imbriquées dans la représentation qu'il propose de processus biogéochimiques dans le continuum sol-plante-atmosphère. Le modèle IPSIM-Pommier, lui, a permis de hiérarchiser les différents impacts des pratiques agricoles et conditions du milieu sur les dégâts des bioagresseurs, considérés comme des fonctions écosystémiques.

Un autre apport important de la modélisation est la possibilité d'explorer différents systèmes de culture et conditions du milieu. La structure en modules de STICS permet d'interchanger facilement différents itinéraires techniques et différentes conditions du milieu. Notre démarche peut alors être utilisée sur plusieurs situations variant en termes de système de culture, de caractéristiques du sol et de caractéristiques climatiques, permettant de créer un maximum de profils de services écosystémiques différents en très peu de temps. Nous avons créé 150 situations différentes en ne faisant varier que 5 leviers d'actions, sans considérer de variabilité pédoclimatique. Il serait intéressant de faire varier les caractéristiques du sol et du climat grâce à une base de données à l'échelle nationale sur verger de pommiers (voir Section 1.3.1).

2.1.2.Limites et perspectives d'évolution des modèles utilisés

Les modèles utilisés présentent des limites pour l'usage que nous en avons fait. Pour le modèle STICS, il s'agit en particulier de la prise en compte de l'enherbement sur l'inter-rang du verger et de celle des équilibres trophiques dans l'arbre ainsi que de leur gestion. Pour le modèle IPSIM-Pommier, la difficulté a été de définir les niveaux de dégâts de bioagresseur. De plus, dans notre cas d'étude, la lutte biologique par conservation n'a pas été suffisamment considérée pour le service de régulation des bioagresseurs, son poids étant très faible ou ses effets pas assez connus par rapport à d'autres moyens de protection. Enfin, le couplage entre les deux modèles pourrait être amélioré.

- Le modèle STICS

La plupart des vergers de pommiers commerciaux présentent un inter-rang enherbé (c'était le cas des deux dispositifs expérimentaux sur lesquels nous avons travaillé). Cet enherbement peut avoir un impact : (i) sur la fonction d'absorption de l'azote et – dans une moindre mesure du fait de l'irrigation localisée sur le rang – de l'eau, via la compétition potentielle entre l'arbre et le couvert végétal pour ces deux éléments, avec des répercussions sur le service de production de fruits, (ii) sur la prévention du lessivage de l'azote et la dénitrification, (iii) sur les flux d'eau dans le sol.

Le modèle STICS est capable de simuler un système de culture composé de deux espèces. Ce système est sous-divisé en trois sous-systèmes (Brisson et al. 2004): la strate dominante (dans notre cas le pommier), le couvert végétal (sur l'inter-rang) à l'ombre et celui exposé au soleil. Chaque sous-système subit un microclimat lumineux qui, estimé par un bilan radiatif, régit les différents comportements des sous-systèmes en termes de croissance (accumulation de biomasse sèche et LAI) et de bilan azoté et hydrique (transpiration, absorption d'azote et indice de stress). Le sol est considéré comme étant le même pour les deux cultures étudiées, avec une différenciation non pas horizontale mais verticale du profil du sol. Les interactions entre les deux systèmes racinaires sont le résultat de l'influence du sol – en termes de pénétrabilité et de dynamique hydrique - sur les profils racinaires de la strate principale et du couvert (Launay et al. 2009). Nous n'avons pas eu le temps de tester le modèle STICS sur l'enherbement d'un verger de pommier dans ce travail de thèse. Mais c'est certainement le point le plus intéressant à développer par la suite. Cela nécessiterait de prendre en main dans un premier temps cette fonctionnalité de STICS avec les types de couverts déjà paramétrés dans la version actuelle de STICS (i.e ; ray-grass, fétuque, prairies permanentes), puis éventuellement de réaliser des mesures en dynamique de LAI, de biomasse aérienne et de teneur en azote et en eau sur les couverts végétaux des vergers de La Pugère et de Gotheron, afin de les paramétrer dans le modèle.

Dans le modèle STICS, nous avons introduit une fonction d'éclaircissages multiples de fruits au cours de la campagne culturale. Cela nécessite cependant de renseigner au préalable la charge initiale en fruits et les charges intermédiaires après chaque éclaircissage. Des travaux spécifiques sur le déterminisme de la charge initiale en fruits et sur les règles de décision d'éclaircissage (i.e. la charge en fruits à laisser pour obtenir le rendement et le diamètre des fruits espérés) pourraient permettre d'améliorer cet aspect. Une amélioration du modèle est à venir pour ce qui concerne les relations trophiques entre organes structuraux de l'arbre et organes annuels (feuilles, fruits et tiges), notamment les réserves. En effet, de nouvelles équations ont été ajoutées dans le modèle STICS pour l'espèce *Miscanthus x giganteus*, qui doivent être rendues génériques pour les cultures pérennes (Strullu et al. 2014). La taille des arbres est prise en compte de façon insuffisante dans la version actuelle du modèle, même si la restitution du bois de taille au sol à la fin de l'année est considérée. On peut se poser, en lien avec ces éléments d'analyse, la question de l'intérêt d'une représentation explicite de l'architecture du pommier et des actes techniques utilisées pour la contrôler (tailles d'hiver et taille en vert, attachage-plier pour l'arcure des branches fruitières, extinction manuelle de points de fructification et végétatifs). La conduite de l'arbre influence fortement l'équilibre entre

croissance végétative et reproductive et donc le retour à fleur, ainsi que la gestion des réserves de l'arbre (Lauri et al. 2009).

- Le modèle IPSIM-Pommier

La limite du modèle IPSIM-Pommier réside en grande partie dans les difficultés à qualifier (i) l'efficacité et la hiérarchisation des différents leviers d'action pour contrôler les bioagresseurs et (ii) les niveaux de dégâts des bioagresseurs, qui dans la pratique suppose d'apprécier le lien entre dégâts et dommages de récolte. Ce deuxième point n'est pas sans rapport avec la notion de seuil de nuisibilité économique, au-dessus duquel le coût des dommages de récolte induits est plus élevé que celui des traitements de protection (Zadoks 1985). D'une part, il ne faut pas perdre de vue que la fonction reliant dégâts et dommages est spécifique à chaque couple espèce/bioagresseurs (Fig. 6.2). Sur la Fig. 6.2, la courbe rouge fait plutôt référence à des bioagresseurs ayant un impact direct sur le fruit (ex : le carpocapse) et illustre un faible pourcentage de dégâts provoquant des dommages élevés. La courbe verte représente le cas où il faut un fort pourcentage de dégâts pour avoir un impact en termes de dommage sur la récolte. Les experts consultés pour fixer les seuils qualitatifs d'IPSIM-Pommier (niveau de dégâts « faible », « moyen », « fort ») représentaient un contexte particulier : celui d'un verger de pommier conduit de manière raisonnée dans le sud-est de la France.

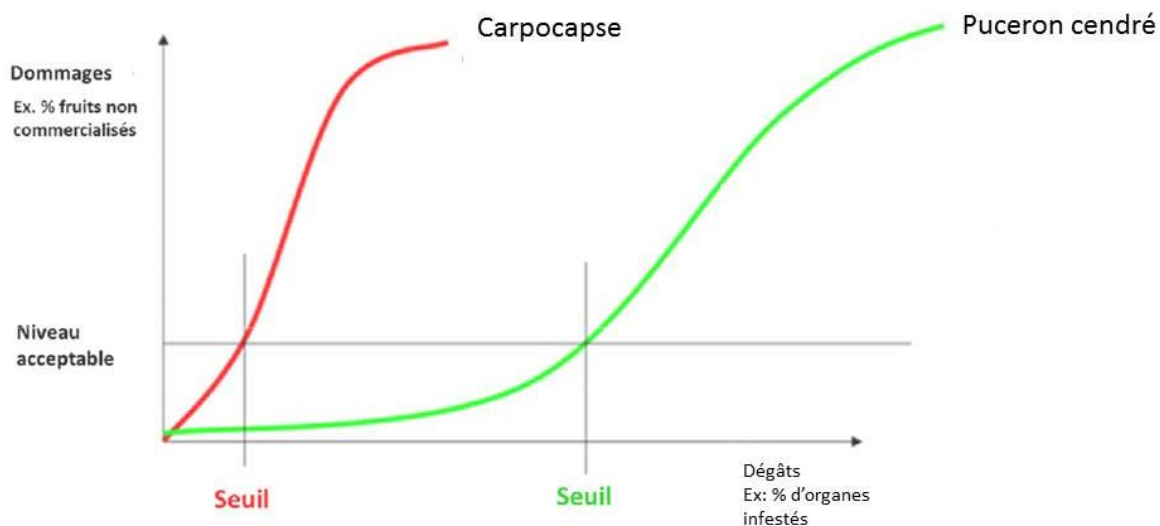


Figure 6.2: Relations entre dégâts et dommages de récolte avec l'exemple du carpocapse et du puceron cendré (Laget et al, 2015). Le seuil de dégâts dépassant un niveau acceptable est plus petit pour le carpocapse, étant donné que les dégâts impactent plus directement le nombre de fruit commercialisables.

De plus, il est en principe important, vu le caractère pérenne du pommier, de prendre en compte l'effet cumulatif de la pression d'un bioagresseur sur plusieurs années. Par exemple, Bevacqua et al.,

(2016) ont montré que les conséquences d'une infestation de pucerons sur le rendement d'un verger de pêchers ne sont visibles qu'à l'échelle de la durée de vie du verger (c'est-à-dire environ 10 ans). La rémanence des populations sur les vergers est aussi un point important à considérer sur une échelle multi-annuelle. La larve en diapause du carpocapse ou les pseudothèces immatures de *Venturia inaequalis* sont des formes de survie des bioagresseurs du pommier, qui vont augmenter les risques de développement et l'intensité des attaques l'année suivante. Dans le modèle IPSIM-Pommier, nous avons considéré l'effet de la pression de l'année n-1 pour la tavelure et l'effet des générations pour le carpocapse, mais pour ce dernier il est encore difficile de prédire les retombées d'une pression de l'année n-1 sur l'année n. Un modèle simulant des situations à une échelle multi-annuelle pourrait permettre de travailler plus précisément le niveau de dégâts des bioagresseurs.

- Le couplage STICS-IPSIM-Pommier

Nous avons proposé un couplage des modèles STICS et IPSIM-Pommier qui reste limité. Ceci est lié, dans un premier temps, aux leviers de pratiques utilisés pour la création des 150 systèmes fictifs. En effet, nous n'avons tenu compte que de quelques pratiques de protection pour la gestion du carpocapse (filet AltCarpo, lutte chimique, lutte par produit de biocontrôle), du puceron cendré (lutte chimique, utilisation d'argile ou huiles) et de la tavelure (lutte chimique, variétés, bâches anti-pluie, cuivre et soufre). Les seuls couplages entre ces pratiques de protection et les fonctions étudiées dans STICS étaient : (i) l'utilisation de filets Alt'Carpo ou de bâches anti-pluie qui atténuent le rayonnement lumineux ou les apports d'eau de pluie et (ii) les pratiques de protection contre le puceron cendré qui impactent, par l'intermédiaire des dégâts de puceron, le LAI entre le pic de vol des pucerons et la mise en place du LAI maximal, modifiant ainsi l'équilibre trophique entre organes végétatifs et fruits.

Dans un second temps, les dégâts du carpocapse et de la tavelure, convertis de valeurs qualitatives (IPSIM-Pommier) à des valeurs quantitatives pour le couplage, n'ont pas été considérés au cours de la campagne culturale, mais à la récolte uniquement. Ainsi, les changements physiologiques dans l'arbre (notamment les rapports sources-puits) liés aux pertes de feuilles et de fruits par ces deux bioagresseurs, n'ont pas été pris en compte. Pour la tavelure, les dégâts sur feuilles n'ont pas été considérés. Ils auraient néanmoins diminué la surface foliaire du pommier, augmentant ainsi la possibilité de situation de stress pour l'arbre sous STICS. Un module « bioagresseurs » a été créé en couplage avec STICS : MILA. Il simule le développement des pathogènes fongiques aériens de manière dynamique et générique. Il est couplé à STICS de façon à échanger au pas de temps journalier : (i) des variables caractérisant le microclimat et la croissance du couvert calculées par

STICS et (ii) la surface foliaire atteinte par la maladie et donc non photosynthétiquement active, calculées par MILA (Caubel et al. 2012; Caubel et al. 2014). Ce module pourrait être adapté à la tavelure dans le cas du verger de pommiers. Pour ce qui concerne le couplage avec la dynamique du puceron cendré, des bases de connaissance existent sur le pathosystème pêche-puceron vert, proche du pathosystème pommier-puceron cendré, et son fonctionnement selon la fertilisation azotée ainsi que la taille des arbres (Grechi et al. 2008; Sauge et al. 2010; Rousselin et al. 2016) et un modèle a été conçu (Grechi et al. 2010) qui pourrait être une source d’inspiration.

Enfin, il est à noter que la conversion des valeurs qualitatives simulées par IPSIM-Pommier en valeurs quantitative pour le couplage avec STICS est discutable. Il existe un seuil de nuisibilité au-delà duquel les dégâts d’un bioagresseur seront préjudiciables sur le plan économique. Pris dans des contextes économiques différents (notamment en ce qui concerne le circuit de commercialisation), ces seuils peuvent être très divergents et ainsi considérablement modifier la conversion entre simulations qualitatives de dégâts et valeurs quantitatives. Par exemple, ce seuil sera plus élevé pour des pommes certifiées AB que pour des pommes provenant de vergers conventionnels, en particulier si elles sont destinées à l’export.

2.2. Utilisation de la notion de « système technique »

L’approche par « système technique », qui considère l’ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou des parcelles dans un objectif de production, connaît un développement assez récent en arboriculture. Dans notre étude, nous avons utilisé cette approche, qui récuse l’idée d’une relation biunivoque entre une pratique agricole et un état particulier de l’agroécosystème. Cela permet aussi de se rapprocher des conditions dans lesquelles le producteur fait ses choix de gestion de production. En appréhendant l’adaptation de gammes de systèmes techniques à des objectifs (Doré et al. 2011), dans notre cas des bouquets de services, nous ouvrons la voie à la conception de systèmes agricoles optimisant ces bouquets (voir Section. 3.2).

2.3. Représentation des profils de services

Nous avons choisi de présenter les bouquets de services de chaque système de culture étudié par des radars, comme c’est le cas dans d’autres études de services écosystémiques multiples (Schipanski et al. 2014; Syswerda and Robertson 2014; Howe et al. 2014). La surface du radar définit l’ampleur de la distribution des services. Pour la première gamme de situations étudiée, les radars étaient contrastés, montrant un effet important du croisement entre les caractéristiques pédoclimatiques et

les pratiques culturelles. Les radars représentant les profils de services de la deuxième gamme de situations, construits pour quatre groupes de systèmes de culture fictifs, montrent des différences plus graduelles selon que le type de service le plus pourvu est marchand ou non-marchand

Dans notre étude, la valeur maximale utilisée pour normaliser les valeurs d'indicateurs sur les radars était différente entre les deux gammes de situations étudiées, puisqu'il s'agissait à chaque fois de la valeur maximale de l'ensemble des systèmes de culture étudiés. Il serait plus judicieux d'utiliser, pour un contexte pédoclimatique donné, des valeurs maximales de plus large portée, plus proches de la notion de valeur asymptotique de service. La modélisation peut être un recours pour rechercher ces valeurs.

3. *Recomposer des logiques de gestion du verger de pommier avec comme objectif*

l'optimisation de services écosystémiques multiples

3.1 Guider et structurer l'acquisition de nouvelles connaissances agroécologiques

3.1.1 Le rôle de la modélisation

L'utilisation de modèles pour la conception de systèmes de culture prend aujourd'hui une réelle ampleur dans les milieux de la recherche fondamentale aussi bien qu'appliquée (Ould-Sidi and Lescourret 2011). Outre qu'ils permettent de prendre en compte la complexité d'un agroécosystème, les modèles sont capables de structurer les connaissances acquises et d'orienter les expérimentations. Le schéma ci-dessous (Fig. 6.3) illustre les perspectives de ce travail de thèse. Le point de départ est l'utilisation de modèles – STICS, IPSIM et/ou d'autres modèles – guidant l'expérimentation pour mesurer les impacts de pratiques sur le fonctionnement d'un verger de pommiers, en gardant comme objectif la distribution de services. Ces expérimentations alimentent des bases de données permettant :

(i) de paramétrer ou valider des modèles. Une des perspectives de ce travail de thèse serait de valider le modèle STICS au pommier, en utilisant une base de données plus étendue, à l'échelle nationale. L'interaction sol-pommier via le modèle STICS apporte indéniablement un plus à l'analyse du fonctionnement du verger et le travail déjà réalisé sur le modèle pourrait servir d'amorce pour la constitution d'un « STICS-Pommier ».

(ii) d'approfondir une question de recherche en particulier. Dans notre cas, deux points nécessitant la mise en place d'expérimentations pourraient être approfondis : l'impact de la gestion du sol (voir Section 3.1.2) sur la qualité et la quantité de matières organiques dans le sol et celui de la biodiversité planifiée sur la régulation des bioagresseurs (voir Section 3.1.3).

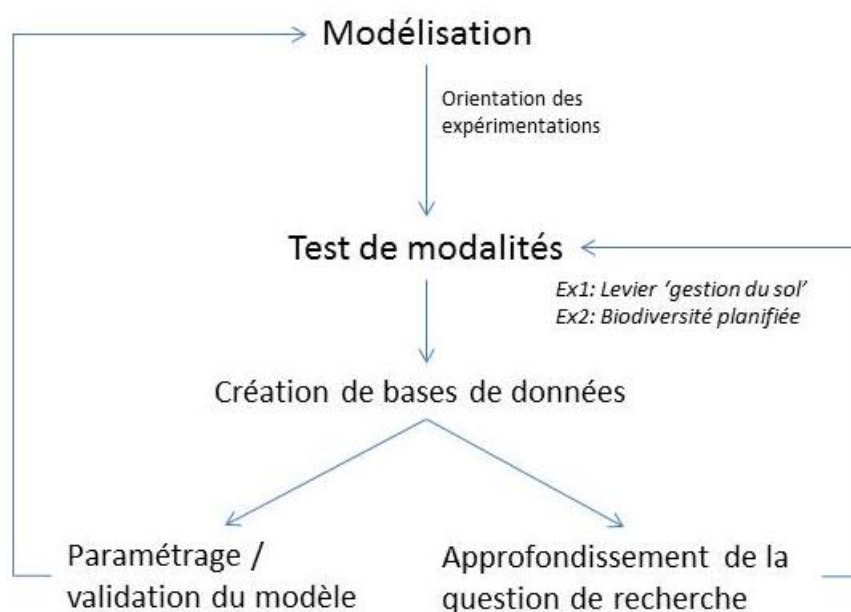


Figure 6.3: Schéma conceptuel de la structuration des connaissances guidée par la modélisation, sous un angle très général.

3.1.2 Optimiser la gestion du sol pour améliorer la qualité et la quantité des matières organiques

Nous avons vu qu'il était important de considérer certaines fonctions du sol à une échelle temporelle multi-annuelle et de prendre en compte ses éléments biotiques. Par ailleurs, les conditions de formation et d'évolution de la matière organique du sol ne doivent pas être négligées. La gestion du sol pourrait être un levier intéressant pour la mise en place et les transformations de cette matière organique. L'apport d'amendement organique est souvent utilisé pour compenser les pertes en humus. Le rapport C/N de cet amendement joue un rôle fondamental dans l'amélioration de la qualité des matières organiques et modifie les services en lien avec le sol, comme l'émission de protoxyde d'azote (Huang et al. 2004). L'utilisation de bois raméaux fragmentés en verger de pommiers a un effet positif sur l'activité des vers de terre et augmente le rapport C/N du sol, l'enherbement stimule l'activité biologique en améliorant la macroporosité du sol (Glover et al. 2000; Hoagland et al. 2008; Deurer et al. 2009; Teravest et al. 2011) et le type de couvert végétal peut avoir des impacts sur la disponibilité de l'azote dans le sol et la régulation du climat (Haynes 1980; Jensen

et al. 2012). Pour mesurer l'impact de ces pratiques agricoles, plusieurs protocoles existent. Le dispositif SolAB (Fourrié et al. 2013) propose quatre outils de diagnostic simplifiés : le test bêche pour évaluer la structure du sol et trois bio-indicateurs liés aux populations ou à l'activité des vers de terre. Muscolo et al. (2014) présentent un ensemble d'indicateurs de l'activité biologique, comme le pourcentage de matière organique du sol (en 10^1 g/kg sol), la masse microbienne (en mg C /g sol) ou des indicateurs de l'activité enzymatique des micro-organismes du sol. Parmi les méthodes mises en œuvre pour caractériser la matière organique, celles basées sur des fractionnements granulométriques ont été utilisées avec succès. Elles permettent de séparer des compartiments organiques différents par leur morphologie, leur origine et leur composition (Tiessen and Stewart 1988). Un dernier point à approfondir serait celui de l'impact des pesticides (en particulier des herbicides) sur l'activité biologique responsable des transformations pédologiques.

3.1.3 Utiliser la biodiversité planifiée pour réguler les bioagresseurs

Les fonctions écologiques sous-tendant la régulation des bioagresseurs peuvent être modulées par le recours à la biodiversité planifiée (Lescourret et al. 2016). Cette régulation peut s'exercer par des mécanismes de répulsion, de résistance ou de barrière induits par des espèces végétales bien choisies (Ratnadass et al. 2012). Elle peut également utiliser des plantes « réservoirs » (Frank 2010) permettant d'apporter un habitat « alternatif » aux ennemis de la plante hôte. Dans IPSIM-Pommier, le poids donné aux infrastructures agroécologiques soutenant la biodiversité planifiée est très faible. On pourrait réfléchir à la mise en place d'un modèle évaluant la capacité de la biodiversité à réguler les bioagresseurs d'un verger sur la base d'observations, de dires d'experts ou d'expérimentations existantes (Maalouly et al. 2013; Monteiro et al. 2013; Boreau de Roince et al. 2013; Simon et al. 2015; Marliac et al. 2015) ou à mettre en place.

3.2 Co-concevoir des logiques de gestion durable de vergers via la conception assistée par modèles : perspectives de recherche issues du travail de thèse

3.2.1 De la notion de conflit entre services à celle d'optimisation multicritère

Pour résoudre les conflits entre services, comme nous l'avons fait dans ce travail, la recherche de compromis est nécessaire. Plusieurs auteurs se sont penchés sur la question du compromis entre services (Nelson et al. 2008; Kragt and Robertson 2014; Rapidel et al. 2015). La plupart de ces études se basent sur une approche d'analyse décisionnelle multicritères (ADMC), qui évalue et priorise les compromis entre services écosystémiques en les quantifiant. Plusieurs méthodes peuvent être

utilisées pour cette évaluation. Dans le cadre de la recherche de leviers de gestion comme les systèmes de culture – permettant d’optimiser les compromis entre services écosystémiques - la méthode la plus utilisée est la méthode de Pareto-dominance (Groot and Rossing 2011; Sanon et al. 2012; Seppelt et al. 2013). Une autre méthode, qui cette fois suit une approche agrégative, évalue les systèmes de culture selon leur capacité à satisfaire un profil de services prédéfini. Ce genre d’approche a été suivie dans les travaux de Grechi et al., (2012), où ont été évalués 162 systèmes de cultures candidats dont les performances étaient prédéfinies selon différents types d’agriculture (productive et économique, productive et durable, soucieuse de la qualité des produits et de l’environnement).

Les indicateurs de services écosystémiques tels que ceux utilisés dans ce travail de thèse peuvent donc être considérés comme des objectifs (critères) que l’on cherche à optimiser. Afin de générer un grand nombre de systèmes de culture potentiellement intéressants pour la recherche de cet optimum, il est possible de coupler un modèle d’agroécosystème à un algorithme d’optimisation multicritère. Des algorithmes évolutifs inspirés de la théorie de la sélection naturelle (Yao and Xu 2006) peuvent être utilisés à cette fin. Ces algorithmes explorent d’une manière intelligente l’espace du possible (combinaisons de leviers d’actions). L’algorithme commence par une population initiale, dans notre cas des systèmes de culture de pommier. A chaque nouvelle génération, il sélectionne un groupe de solutions (systèmes de culture) qu’il recombine en de nouveaux descendants en appliquant des mutations afin de maintenir une diversité dans la population. La sélection de solutions optimales est basée sur le niveau de convenance des systèmes de culture par rapport aux critères évalués, ici les valeurs des indicateurs de services écosystémiques. Le processus est répété jusqu’à atteindre la satisfaction des critères prédéfinis (Fig. 6.4).

3.2.2 Implication des parties prenantes dans l’optimisation multicritère

Comme expliqué par Memmah et al., (2015), les parties prenantes, ayant des intérêts divergents et des perceptions différentes, peuvent être impliquées dans le processus d’évaluation et de co-conception via trois approches (Fig. 6.4). L’approche a priori permet aux différents acteurs d’exprimer leurs préférences avant l’étape d’initialisation. Les acteurs peuvent proposer une « population-parents » à initialiser, c’est-à-dire un ensemble de systèmes de culture qui, d’après eux, permettraient d’optimiser un maximum de services écosystémiques. La conception de population-parents pourrait se faire selon une certaine pondération des services ou selon des seuils au-delà desquels il ne peut y avoir un bénéfice tiré du service. Par exemple, le rendement pourrait être limité par un seuil en dessous duquel il y aurait une trop grosse perte économique pour l’arboriculteur.

L'approche interactive permet aux décideurs de changer leurs préférences pendant la recherche de systèmes de culture optimisant les services souhaités, c'est-à-dire au moment de l'évaluation des compromis, en changeant par exemple les pondérations de chaque service utilisées dans l'approche a priori. Enfin dans l'approche a posteriori les décideurs analysent les résultats de l'optimisation de services puis décident de changer leurs préférences de départ ou de tester les nouveaux systèmes de cultures en expérimentation.

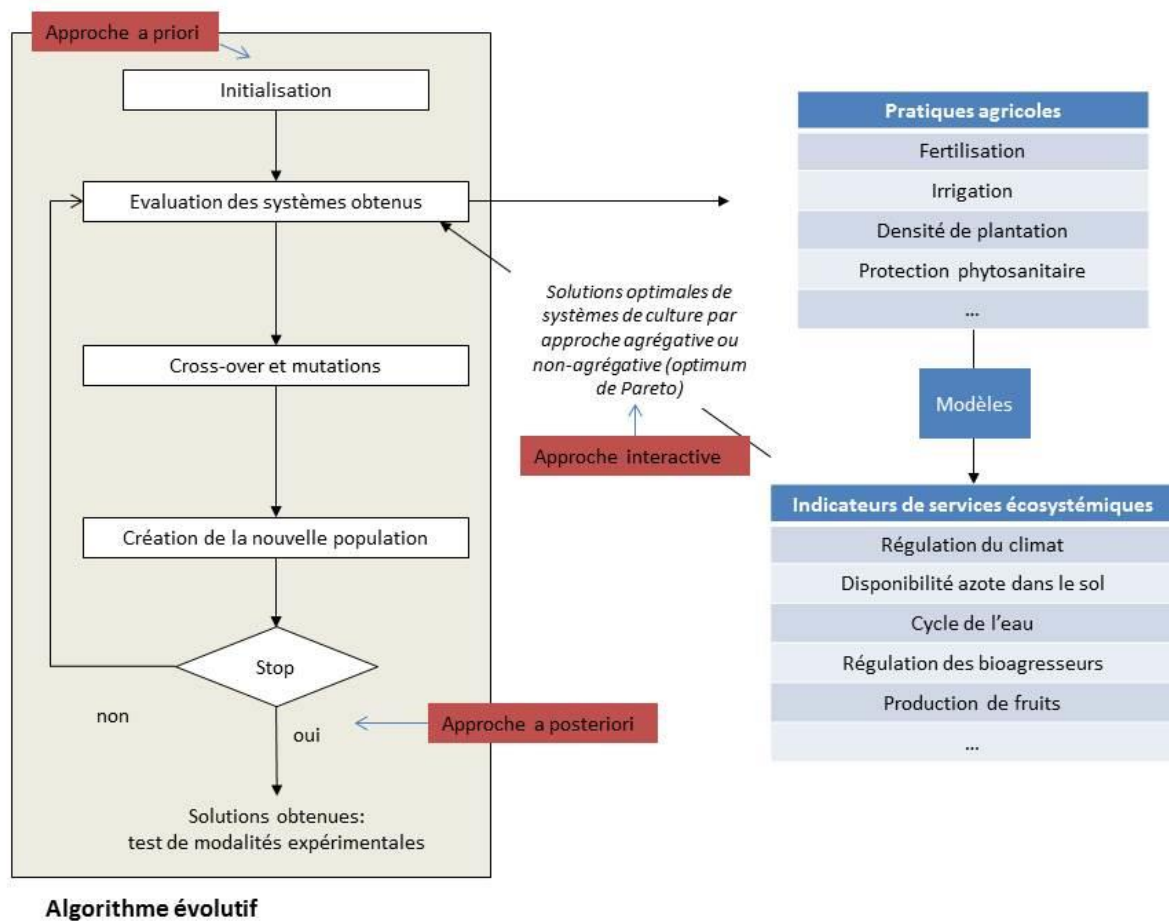


Figure 6.4: Schéma de la méthode d'optimisation multi-critère couplant algorithme évolutif et modélisation (adapté de Grechi et al 2012) en vue en vue d'une co-conception de systèmes de vergers de pommier. Les trois approches a priori, interactive et a posteriori permettant d'impliquer des parties prenantes dans la conception sont illustrées par des cases rouges.

BIBLIOGRAPHIE

- Agreste (2011) Recensement Général Agricole de 2010. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- Agrios G (2012) Plant pathology. Elsevier
- Alaphilippe A, Simon S, Brun L, Hayer F, Gaillard G (2013) Life cycle analysis reveals higher agroecological benefits of organic and low-input apple production. *Agron Sustain Dev* 33:581–592. doi: 10.1007/s13593-012-0124-7
- Alberti A, Vieira RG, Drilleau JF, Wosiacki G, Nogueira A (2011) Apple wine processing with different nitrogen contents. *Brazilian Arch Biol Technol* 54:551–558. doi: 10.1590/S1516-89132011000300017
- Alsina MM, Fanton-Borges AC, Smart DR (2013) Spatiotemporal variation of event related N₂O and CH₄ emissions during fertigation in a California almond orchard. *Ecosphere* 4:art1. doi: 10.1890/ES12-00236.1
- Altieri MA, Nicholls CI (2003) Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil Tillage Res* 72:203–211. doi: 10.1016/S0167-1987(03)00089-8
- Andersen L, Kühn BF, Bertelsen M, Bruus M, Larsen SE, Strandberg M (2013) Alternatives to herbicides in an apple orchard, effects on yield, earthworms and plant diversity. *Agric Ecosyst Environ* 172:1–5. doi: 10.1016/j.agee.2013.04.004
- ANSES (2015) Avis n°2015-1 relatif à l'évaluation et la gestion des produits phytopharmaceutiques : consolider l'indépendance de l'Anses après la loi du 13 octobre 2014. Saisine n°12 122.
- Antle J, Capalbo S (2002) Agriculture as a Managed Ecosystem: Policy Implications. *J Agric Resour Econ* 27:1–15.
- Aoyama M, Nagumo T (1997) Effects of heavy metal accumulation in apple orchard soils on microbial biomass and microbial activities. *Soil Sci Plant Nutr* 43:601–612. doi: 10.1080/00380768.1997.10414786
- Athanassov A, Jeanneret P, Charmillot P, Renard D (1998) Parasitoids of codling moth and other leafrollers (Lepidoptera, Tortricidae) in apple orchards and forests in south-west. *Bull. la société Entomol. suisse* 71:153–162.

- Atkinson C, Polcarpo M, Webster A, Kuden A (1998) Drought tolerance of apple rootstocks: Production and partitioning of dry matter. *Plant Soil* 206:223–235. doi: 10.1023/A:1004415817237
- Atucha A, Merwin I, Brown M, Gardiazabal F, Mena F, Adriazola C, Lehmann J (2013) Soil erosion, runoff and nutrient losses in an avocado (*Persea americana* Mill) hillside orchard under different groundcover management systems. *Plant Soil* 368:393–406. doi: 10.1007/s11104-012-1520-0
- Aubertot J, Robin M (2013) Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *PLoS One*. doi: 10.1371/journal.pone.0073202
- Aubertot JN, Barbier JM, Carpentier A, Gril JJ, Guichard L, Lucas P, Savary S, Savini I, Voltz M (2005) Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA et Cemagref (France)
- Aubry O (2008) Lutte attracticide et lâchers inondatifs de trichogrammes contre le carpocapse de la pomme, *cydia pomonella* (lepidoptera : tortricidae). PhD Thesis. Université du Québec à Montréal.
- Baggs E, Rees R, Smith K, Vinten A (2000) Nitrous oxide emissions from soils after incorporating crop residues. *Soil use Manag* 16:82–87.
- Balachowsky A (1996) Entomologie appliquée à l'agriculture. Tome II, Lépidoptères. Masson and Cie, Paris
- Balzan M, Bocci G, Moonen A (2014) Augmenting flower trait diversity in wildflower strips to optimise the conservation of arthropod functional groups for multiple agroecosystem services. *J Insect Conserv* 18:713–728. doi: 10.1007/s10841-014-9680-2
- Barzman M, Bàrberi P, Birch A, Boonekamp P, Dachbrodt-Saaydeh S, Graf B, Hommel B, Jensen J, Kiss J, Kudsk P, Lamichhane J, Messéan A, Moonen A, Ratnadass A, Ricci P, Sarah J, Sattin M (2015) Eight principles of integrated pest management. *Agron Sustain Dev* 35:1199–1215. doi: 10.1007/s13593-015-0327-9
- Bastías RM, Losciale P, Chieco C, Rossi F, Corelli Grappadelli L (2011) Physiological aspects affected by

- photosensitive nets in apples: preliminary studies. *Acta Hort* 907:217–220. doi: 10.17660/ActaHortic.2011.907.32
- Baumgärtner J, Bieri M (2006) Fruit tree ecosystem service provision and enhancement. *Ecol Eng* 27:118–123. doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.12.005
- Beaudry R, Schwallier P, Lenington M (1993) Apple maturity prediction: An extension tool to aid in fruit storage decisions. *Horttechnology* 3:233–239.
- Becerra A, Botta G, Bravo X, Tourn M, Melcon F, Vazquez J, Rivero D, Linares P, Nardon G (2010) Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amigdalus* L.) orchard in Almería España. *Soil Tillage Res* 107:49–56. doi: 10.1016/j.still.2010.02.001
- Beers EH, Suckling DM, Prokopy RJ, Avilla J (2003) Ecology and management of apple arthropod pests. In: Ferree D., Warrington IJ (eds) *Apples: botany, production and uses*, CAB Intern. CABI, Wallingford, pp 489–519
- Bennett EM, Peterson GD, Gordon LJ (2009) Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecol Lett* 12:1394–1404. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x
- Berger P-L (2009) L'argile Kaolinite pour protéger les vergers bio. *Réussir fruits et légumes* 289:
- Bevacqua D, Grechi I, Génard M, Lescourret F (2016) The consequences of aphid infestation on fruit production become evident in a multi-year perspective: Insights from a virtual experiment. *Ecol Modell* 338:11–16. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.07.022
- Bianchi F, Booij C, Tscharntke T (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc R Soc Biol Sci* 273:1715–1727.
- Biddinger D, Hull L (1995) Effects of several types of insecticides on the mite predator, *Stethorus punctum* (Coleoptera: Coccinellidae), including insect growth regulators and abamectin. *J Econ Entomol* 88:358–366. doi: 10.1093/jee/88.2.358
- Biddinger DJ, Robertson JL, Mullin C, Frazier J, Ashcraft SA, Rajotte EG, Joshi NK, Vaughn M (2013) Comparative Toxicities and Synergism of Apple Orchard Pesticides to *Apis mellifera* (L.) and *Osmia cornifrons* (Radoszkowski). *PLoS One* 8:e72587. doi: 10.1371/journal.pone.0072587
- Blommers LHM (1999) Probing the natural control of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea*

- (Hemiptera: Aphididae). IOBC WPRS Bull 22:53–56.
- Boaretto R, Mattos D, Quaggio J, Cantarella H, Trivelin P (2013) Absorption of $^{15}\text{NH}_3$ volatilized from urea by Citrus trees. *Plant Soil* 365:283–290. doi: 10.1007/s11104-012-1380-7
- Bockstaller C, Guichard L, Makowski D, Aveline A, Girardin P, Plantureux S (2008) Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agron Sustain Dev* 28:139–149. doi: 10.1051/agro:2007052
- Bohanec M (2008) DEXi : Program for Multi-Attribute Decision Making User ' s Manual. Version 5.00 1–65.
- Bohanec M, Džeroski S, Žnidaršic M, Messéan A, Scatasta S, Wesseler J (2004) Multi-attribute modelling of economic and ecological impacts of cropping systems. *Informatica* 28:387–392.
- Boivin T, Bouvier JC, Beslay D, Sauphanor B (2003) Phenological segregation of insecticideresistant genotypes in the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae): a case study of ecological divergences associated with adaptive changes in populations. *Genet Res* 81:169:177.
- Boller EF, Häni F, Poehling H-M (2004) Ecological Infrastructures: Ideabook on functional Biodiversity at the Farm Level. Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau (LBL), Lindau
- Bommarco R, Kleijn D, Potts S (2013) Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol Evol* 28:230–238. doi: 10.1016/j.tree.2012.10.012
- Bonhomme R (2000) Bases and limits to using “degree.day” units. *Eur J Agron* 13:1–10. doi: 10.1016/S1161-0301(00)00058-7
- Boreau de Roince C (2012) Biodiversité et aménagements fonctionnels en verger de pommiers : Implication des prédateurs généralistes vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs. PhD Thesis. Agroparistech.
- Boreau de Roince C, Lavigne C, Mandrin J-F, Rollard C, Symondson WOC (2013) Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bull Entomol Res* 103:148–154. doi: 10.1017/S0007485312000636
- Bot A, Benites J (2005) The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food production. *Bull FAO N° 80* 89–94.
- Brisson N, Bussi re F, Ozier-Lafontaine H, Tournebize R, Sinoquet H (2004) Adaptation of the crop

- model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24:409–421. doi: 10.1051/agro
- Brisson N, Itier B, L’Hotel J, Lorendeau J (1998a) Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecol Modell* 107:159–169. doi: 10.1016/S0304-3800(97)00215-9
- Brisson N, Launay M, Mary B, Beaudoin N (2009) Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions QUAE, Paris
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy M, Ruget F, Nicoullaud B, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Guy R, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, Cellier P, Machet J-M, Meynard J-M, Delécolle R (1998b) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agron Agric Environ* 18:311–346.
- Brown M, Tworkoski T (2004) Pest management benefits of compost mulch in apple orchards. *Agric Ecosyst Environ* 103:465–472. doi: 10.1016/j.agee.2003.11.006
- Brown MW, Mathews CR (2007) Effective biological control of rosy apple aphids by interplanting peach trees into apple orchards. *The Organic Tree Fruit Research Symposium*
- Brun L, Didelot F, Parisi L (2008) Effects of apple cultivar susceptibility to *Venturia inaequalis* on scab epidemics in apple orchards. *Crop Prot* 27:1009–1019.
- Brun L, Didelot F, Parisi L (2007) Stratégies de protection innovantes contre la tavelure du pommier : conception, évaluation et intégration en verger. *Innov Agron* 1:33–45.
- Burel F, Garnier E, Amiaud B, Aulagnier S, Butet A, Chauvel B, Cécile V (1994) Les effets de l’agriculture sur la biodiversité. In: ESCo “Agriculture et Biodiversité.” pp 1–139
- Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S (2013) Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 368:20130122–20130122. doi: 10.1098/rstb.2013.0122
- Caffier V, Lasserre-Zuber P, Giraud M, Lascostes M, Stievenard, R., Lemarquand A, Durel CE (2014) Erosion of quantitative host resistance in the apple × *Venturia inaequalis* pathosystem. *Infect Genet Evol* 27:481–489.

- Calvet R (2003) Le sol: propriétés et fonctions. France Agricole Editions, Paris
- Carisse O, Bernier J (2002) *Microsphaeropsis ochracea* sp. nov. associated with dead apple leaves. *Mycologia* 94:297–301.
- Carisse O, Jobin T (2006) La tavelure du pommier : mieux comprendre pour mieux intervenir. *Agriculture Agroaliment Canada* 10203F:1–26.
- Carisse O, Phillion V, Rolland D, Bernier J (2000) Effect of fall application of fungal antagonists on spring ascospore production of ascospores of apple scab pathogen, *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* 90:31–37.
- Carisse O, Rolland D (2004) Effect of timing of application of the biological control agent *Microsphaeropsis ochracea* on the production of ascospores by *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* 94:1305–1314.
- Caubel J, Launay M, Garcia de Cortazar-Atauri I, Ripoché D, Huard F, Buis S, Brisson N (2014) A new integrated approach to assess the impacts of climate change on grapevine fungal diseases: the coupled MILA-STICS model. *Spécial Laccave, J Int des Sci la Vigne du Vin* 45–54.
- Caubel J, Launay M, Lannou C, Brisson N (2012) Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecol Modell* 242:92–104.
- Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu HL, Waskom RM, Niu Y, Siddique KHM (2016) Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agron Sustain Dev* 36:1–21. doi: 10.1007/s13593-015-0338-6
- Charmillot PJ, Höhn H (2007) Carpocapse des pommes et des poires *Cydia pomonella* L. *Agroscope* 101:1–3.
- Cheng L, Raba R (2009) Accumulation of Macro- and Micronutrient and Nitrogen Demand-supply Relationship of “Gala”/“Malling 26” Apple Trees Grown in Sand Culture. *J Am Soc Hortic Sci* 1:3–13.
- Chouinard G (2014) Guide de référence en production fruitière intégrée. Pour les producteurs de pommes du Québec. <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>.
- CITEPA (2016) Rapport National d’Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des

Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto (CCNUCC). CITEPA, Paris

Codron J, Giraud-Héraud E, Soler L (2005) Minimum quality standards, premium private labels, and European meat and fresh produce retailing. *Food Policy* 30:270–283. doi: 10.1016/j.foodpol.2005.05.004

Collins DL, Machado W (1943) Reactions of the codling moth to artificial light and the use of light traps in its control. *J Econ Entomol* 36:885–892.

Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260.

Costes E, Lauri P, Simon S, Andrieu B (2013) Plant architecture, its diversity and manipulation in agronomic conditions, in relation with pest and pathogen attacks. *Eur J Plant Pathol* 135:455–470. doi: 10.1007/s10658-012-0158-3

Costes E, Sinoquet H, Kelner JJ, Godin C (2003) Exploring within-tree architectural development of two apple tree cultivars over 6 years. *Ann Bot* 91:91–104. doi: 10.1093/aob/mcg010

Costes E, Smith C, Renton M, Guédon Y, Prusinkiewicz P, Godin C (2008) MappleT: simulation of apple tree developmen using mixed stochastic and biochemical models. *Funct Plant Biol* 936–950.

Craheix D, Angevin F, Bergez J-E, Bockstaller C, Colomb B, Guichard L, Reau R, Doré T (2012) MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable TT - MASC 2.0 : a multi attribute tool for the assessment of the sustainability of cropping systems. *Innov Agron* 20:35–48.

Cruz de Boelpaepe MO, Filipe NM, Afonso VC (1987) Dynamique des populations aphidiennes en verger de pommiers. Leurs fluctuations saisonnières dans la province de Beira-Baixa (Portugal) en fonction des facteurs de l'environnement. *La défense des Végétaux* 246:5–16.

Cumming G, Spiesman B (2006) Regional problems need integrated solutions: Pest management and conservation biology in agroecosystems. *Biol Conserv* 131:533–543. doi: 10.1016/j.biocon.2006.02.025

Daily G (1997) Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington DC

- Dale V, Polasky S (2007) Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecol Econ* 64:286–296. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.05.009
- Damavandian M (2000) Biology of subterranean populations of woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) (Homoptera: Aphididae), in apple orchards. PhD. University of Stellenbosch, South Africa
- Daudet FA, Lacoite A, Gaudillère JP, Cruiziat P (2002) Generalized Münch coupling between sugar and water fluxes for modelling carbon allocation as affected by water status. *J Theor Biol* 214:481–498. doi: 10.1006/jtbi.2001.2473
- de Groot R, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemsen L (2010) Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol Complex* 7:260–272. doi: 10.1016/j.ecocom.2009.10.006
- De Neve S, Hofman G (2002) Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues. *Biol Fertil Soils* 35:379–386. doi: 10.1007/s00374-002-0483-3
- Debras JF, Senoussi R, Dutoit T (2011) Hedgerow effects on the distribution of beneficial arthropods in a pear orchard in Southern France. *Ecol Mediterr* 37:75–83.
- Dennis F (2003) Flowering, Pollination and Fruit Set and Development. In: Ferree DC, Warrington IJ (eds) *Apples: botany, production and uses*. CABI, Wallingford, pp 153–166
- Desneux N, Decourtye A, Delpuech J (2007) The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annu Rev Entomol* 52:81–106. doi: 10.1146/annurev.ento.52.110405.091440
- Deurer M, Grinev D, Young I, Clothier B, Müller K (2009) The impact of soil carbon management on soil macropore structure: a comparison of two apple orchard systems in New Zealand. *Eur J Soil Sci* 60:945–955. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01164.x
- Dib H, Simon S, Sauphanor B, Capowiez Y (2010) The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. *Biol Control* 55:97–109. doi: 10.1016/j.biocontrol.2010.07.005
- Dick RP (1997) Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: Pankhurst C, Doube BM, Gupta VVSR (eds) *Biological indicators of soil health*. pp 121–156

- Didelot F, Brun L, Parisi L (2007) Effects of cultivar mixtures on scab control in apple orchards. *Plant Pathol* 56:1014–1022. doi: 10.1111/j.1365-3059.2007.01695.x
- Doré T, Makowski D, Malézieux E, Munier-Jolain N, Tchamitchian M, Titttonell P (2011) Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur J Agron* 34:197–210. doi: 10.1016/j.eja.2011.02.006
- Ebel RC, Proebsting EL, Patterson ME (1993) Regulated Deficit Irrigation May Alter Apple Maturity, Quality, and Storage Life. *HortScience* 28:141–143.
- EFSA (2015) Plus de 97 % des aliments contiennent des résidus de pesticides dans les limites légales. In: Commun. Press. 12 mars (Autorité Eur. sécurité des Aliment. <https://www.efsa.europa.eu/fr/press/news/150312>.
- Ehrlich P, Wilson E (1991) Biodiversity Studies - Science and Policy. *Science* (80-) 253:758–762. doi: 10.1126/science.253.5021.758
- Etienne A, Génard M, Lobit P, Mbéguié-A-Mbéguié D, Bugaud C (2013) What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells. *J Exp Bot* 64:1451–1469. doi: 10.1093/jxb/ert035
- European Parliament (2009) Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides.
- Everitt BS, Landau S, Leese M and, Stahl D (2011) Hierarchical Clustering, Cluster An. Chichester, UK
- Fagerholm N, Torralba M, Burgess PJ, Plieninger T (2016) A systematic map of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecol Indic* 62:47–65. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.11.016
- Fallahi E, Khemira H, Righetti TL, Azarenko AN (2002) Influence of foliar application of urea on tree growth, fruit quality, leaf minerals and distribution of urea-driven nitrogen in apples. *Acta Hortic* 594:603–610.
- Fallahi E, Mohan SK (2000) Influence of Nitrogen and Rootstock on Tree Growth, Precocity, Fruit Quality, Leaf Mineral Nutrients, and Fire Blight in “Scarlet Gala” Apple. *Horttechnology* 10:589–592.

- Fereres E, Soriano M (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J Exp Bot* 58:147–159. doi: 10.1093/jxb/erl165
- Fernández-Escobar R, García-Novelo JM, Molina-Soria C, Parra MA (2012) An approach to nitrogen balance in olive orchards. *Sci Hortic (Amsterdam)* 135:219–226. doi: 10.1016/j.scienta.2011.11.036
- Flexner J, Lighthart B, Croft B (1986) The effects of microbial pesticides on non-target, beneficial arthropods. *Agric Ecosyst Environ* 16:203–254. doi: 10.1016/0167-8809(86)90005-8
- Floch C, Capowiez Y, Criquet S (2009) Enzyme activities in apple orchard agroecosystems: How are they affected by management strategy and soil properties. *Soil Biol Biochem* 41:61–68. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.09.018
- Folorunso OA, Rolston DE (1984) Spatial Variability Of Field-measured Denitrification Gas Fluxes. *Soil Sci Soc Am J* 48:1214–1219. doi: 10.2136/sssaj1984.03615995004800060002x
- Forrest JMS, Dixon AFG (1975) The induction of leaf-roll galls by the apple aphids *Dysaphis devecta* and *D. plantaginea*. *Ann Appl Biol* 81:281–288. doi: 10.1111/j.1744-7348.1975.tb01643.x
- Fourrié L, Peigné J, Védie H, Garcin A, Goma Fortin N (2013) SolAB : Limiter le travail du sol et évaluer la fertilité des sols en agriculture biologique. *Innov Agron* 30:125–138.
- Frank SD (2010) Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. *Biol Control* 52:8–16. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.09.011
- Fredon Corse (2008) Suivi phytosanitaire des pommiers, Vallée du Prunelli. In: Fédération Régionale Défense contre les Organismes Nuisibles. http://www.fredon-corse.com/actions/Suivi_phyto_pommiers.htm.
- Gallai N, Salles J, Settele J, Vaissière B (2009) Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol Econ* 68:810–821. doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.014
- García-Nieto A, García-Llorente M, Iniesta-Arandia I, Martín-López B (2013) Mapping forest ecosystem services: From providing units to beneficiaries. *Ecosyst Serv* 4:126–138. doi: 10.1016/j.ecoser.2013.03.003
- Garcia de Cortazar-Atauri I, Brisson N, Gaudillere JP (2009) Performance of several models for

- predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Int J Biometeorol* 53:317–326. doi: 10.1007/s00484-009-0217-4
- Garcia de Cortazar Atauri I (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. PhD. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier
- Garcin A (2009) L'argile kaolinite, une nouvelle méthode de lutte par barrière minérale protectrice contre le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* Sulz. *Innov Agron* 4:107–113.
- Garcin A, Bussi C, Corroyer N, Dupont N, Ondet S, Parveaud C (2012) Alternatives au travail du sol sur le rang et gestion du sol en arboriculture. *Alter Agri* 116:19–21.
- Garratt MPD, Truslove CL, Coston DJ, Evans RL, Moss ED, Dodson C, Jenner N, Biesmeijer JC, Potts SG (2014) Pollination Deficits in UK Apple Orchards. *J Pollinat Ecol* 12:9–14.
- Geiger F, Bengtsson J, Berendse F, Weisser W, Emmerson M, Morales M, Ceryngier P, Liira J, Tscharnkte T, Winqvist C, Eggers S, Bommarco R, Pärt T, Bretagnolle V, Plantegenest M, Clement L, Dennis C, Palmer C, Oñate J, Guerrero I, Hawro V, Aavik T, Thies C, Flohre A, Hänke S, Fischer C, Goedhart P, Inchausti P (2011) Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic Appl Ecol* 12:386–387. doi: 10.1016/j.baae.2011.03.004
- Génard M, Bruchou C (1992) Multivariate analysis of within-tree factors accounting for the variation of peach fruit quality. *Sci Hortic (Amsterdam)* 52:37–51. doi: 10.1016/0304-4238(92)90006-X
- Génard M, Dauzat J, Franck N, Lescourret F, Moitrier N, Vaast P, Vercambre G (2008) Carbon allocation in fruit trees: From theory to modelling. *Trees - Struct Funct* 22:269–282. doi: 10.1007/s00468-007-0176-5
- Glover JD, Reganold JP, Andrews PK (2000) Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric Ecosyst Environ* 80:29–45. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00131-6
- Goh K, Ridgen G, Daly M (1995) Understorey biomass production and biological nitrogen fixation in an organic Apple orchard in Canterbury, New Zealand. *Commun Soil Sci Plant Anal* 26:3261–3273.
- Gomez C, Brun L, Chauffour D, Vallée D, De Le Vallée D (2007) Effect of leaf litter management on

- scab development in an organic apple orchard. *Agric Ecosyst Environ* 118:249–255. doi: 10.1016/j.agee.2006.05.025
- Gontijo L, Beers E, Snyder W (2013) Flowers promote aphid suppression in apple orchards. *Biol Control* 66:8–15. doi: 10.1016/j.biocontrol.2013.03.007
- Graf B, Baumgärtner J, Delucchi V (1985) Life table statistics of three apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, *Rhopalosiphum insertum* and *Aphis pomi* (Homoptera, Aphididae), at constant temperatures. *J Appl Entomol* 99:285–294.
- Graf B, Höpli HU, Höhn H, Samietz J (2006) Temperature effects on egg development of the rosy apple aphid and forecasting of egg hatch. *Entomol Exp Appl* 119:207–211.
- Grappadelli LC (2003) Light relations. In: Ferree DC, Warrington IJ (eds) *Apples: botany, production and uses*. CABI, Wallingford, pp 195–216
- Grechi I, Hilgert N, Sauphanor B, Senoussi R, Lescourret F (2010) Modelling coupled peach tree-aphid population dynamics and their control by winter pruning and nitrogen fertilization. *Ecol Modell* 221:2363–2373. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.06.015
- Grechi I, Ould-Sidi M, Hilgert N, Senoussi R, Sauphanor B, Lescourret F (2012) Designing integrated management scenarios using simulation-based and multi-objective optimization: Application to the peach tree–*Myzus persicae* aphid system. *Ecol Modell* 246:47–59. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.07.023
- Grechi I, Sauge M, Sauphanor B, Hilgert N, Senoussi R, Lescourret F (2008) How does winter pruning affect peach tree–*Myzus persicae* interactions? *Entomol Exp Appl* 128:369–379. doi: 10.1111/j.1570-7458.2008.00720.x
- Green S, Clothier B (1999) The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil* 206:61–77. doi: 10.1023/A:1004368906698
- Greenham D (1980) Nutrient cycling: the estimation of orchard nutrient uptake. In: Atkinson D, Jackson JE, Sharples RO, Waller WM (eds) *Mineral nutrition of Fruit Trees*. Butterworths, Sevenoaks, pp 345–352
- Greenwood DJ, Neeteson JJ, Draycott A (1985) Response of potatoes to N fertilizer: Quantitative relations for components of growth. *Plant Soil* 85:163–183. doi: 10.1007/BF02139622

Griffon M (2006) *Nourrir la planète*. Edition Odile Jacob

Grigg-McGuffin K, Scott IM, Bellerose S, Chouinard G, Cormier D, Scott-Dupree C (2015) Susceptibility in field populations of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), in Ontario and Quebec apple orchards to a selection of insecticides. *Pest Manag Sci* 71:234–242. doi: 10.1002/ps.3787

Groffman PM, Altabet MA, Böhlke JK, Butterbach-Bahl K, David MB, Firestone MK, Giblin AE, Kana TM, Nielsen LP, Voytek MA (2006) Methods for measuring denitrification: diverse approaches to a difficult problem. *Ecol Appl* 16:2091–2122.

Groot J, Rossing W (2011) Model-aided learning for adaptive management of natural resources: An evolutionary design perspective. *Methods Ecol Evol* 2:643–650. doi: 10.1111/j.2041-210X.2011.00114.x

Grove GG, Eastwell KC, Jones AL, Sutton TB (2003) Diseases of apple. In: Ferree DC, Warrington IJ (eds) *Apples: botany, production and uses*. CABI, Wallingford, pp 459–488

Guilpart N (2014) Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium. PhD. Montpellier SupAgro

Gurr GM, Wratten SD, Barbosa P (2000) Success in Conservation Biological Control of Arthropods. In: Gurr G, Wratten S (eds) *Biological Control: Measures of Success*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 105–132

Gutsche V, Rossberg D (1997) SYNOPS 1.1 : a model to assess and to compare the environmental risk potential of active ingredients in plant protection products. *Agric Ecosyst Environ* 64:181–188.

Haines-Young R, Potschin M (2013) Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on version 4, August-December 2012. EEA Framework contract No EEA/IEA/09/003

Haines-Young R, Potschin M (2009) Methodologies for defining and assessing ecosystem services. Final Report, JNCC, Proj Code C08-0170-0062 69 pp.

Hassan SA (1989) Selection of suitable trichogramma strains to control the codling moth (*Cydia pomonella*) and the two summer fruit tortrix moths (*Adoxophyes orana*, *Pandemis heparana* [Lep.: Tortricidae]). *Entomophaga* 34:19–27. doi: 10.1007/BF02372583

- Haynes R (1980) Influence of soil management practice on the orchard agro-ecosystem. *Agro-Ecosystems* 6:3–32. doi: 10.1016/0304-3746(80)90003-7
- Haynes R, Goh K (1980) Distribution and budget of nutrient in a commercial apple orchard. *Plant Soil* 56:445–457.
- Heal G, Small A (2002) Agriculture and its External Linkages. In: Gardner B, Rausser G (eds) *Handbook of Agricultural Economics: Volume 2A*. Elsevier, Amsterdam, pp 1342–1369
- Helliwell DR (1969) Valuation of wildlife resources. *Reg Stud* 3:41–49.
- Hénault C, Rochette P, Kuikman P, Flénet F, Cellier P (2013) Le protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles: méthodes d'inventaire et leviers de réduction. *OCL* 20:108–118.
- Hester SM, Cacho O (2003) Modelling apple orchard systems. *Agric Syst* 77:137–154. doi: 10.1016/S0308-521X(02)00106-3
- Hillel D (1992) *Out of the Earth: Civilization and the Life of the Soil*. University of California Press
- Hoagland L, Carpenter-Boggs L, Granatstein D, Mazzola M, Smith J, Peryea F, Reganold J (2008) Orchard floor management effects on nitrogen fertility and soil biological activity in a newly established organic apple orchard. *Biol Fertil Soils* 45:11–18. doi: 10.1007/s00374-008-0304-4
- Holb J (2005) Effect of Pruning on Apple Scab in Organic Apple Production. *Plant Dis* 89:611–618. doi: 10.1094/PD-89-0611
- Holb J, Dremák P, Bitskey K, Gonda I (2012) Yield response, pest damage and fruit quality parameters of scab-resistant and scab-susceptible apple cultivars in integrated and organic production systems. *Sci Hortic (Amsterdam)* 145:109–117.
- Hoogmoed M, Sadras VO (2016) The importance of water-soluble carbohydrates in the theoretical framework for nitrogen dilution in shoot biomass of wheat. *F Crop Res*. doi: 10.1016/j.fcr.2016.04.009
- Hooper DU, Chapin FS, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton JH, Lodge DM, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad AJ, Vandermeer J, Wardle DA (2005) Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol Monogr* 75:3–35.

- Hossain M., Piotrowski M, Lensing J, Gau AE (2009) Inhibition of conidial growth of *Venturia inaequalis* by the extracellular protein fraction from the antagonistic bacterium *Pseudomonas fluorescens* Bk3. , 48, 2 : Biol Control 48:133–139.
- Howe C, Suich H, Vira B, Mace GM (2014) Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world. Glob Environ Chang 28:263–275. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.07.005
- Howell JF, Knight AL, Unruh TR, Brown DF, Krysan JL, Sell CR, Kirsch PA (1992) Control of Codling Moth in Apple and Pear with Sex Pheromone-Mediated Mating Disruption. J Econ Entomol 85:918–925.
- Huang Y, Zou J, Zheng X, Wang Y, Xu X (2004) Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. Soil Biol Biochem 36:973–981. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.02.009
- Ilhan K, Arslan U, Karabulut OA (2006) The effect of sodium bicarbonate alone or in combination with a reduced dose of tebuconazole on the control of apple scab. Crop Prot 25:963–967.
- IOBC / WRPS (1997) Guidelines for integrated production of stone fruits. IOBC Technical Guideline III 2nd Edition. IOBC WPRS Bull 26:11–20.
- IPCC (1995) Climate change 1995. The science of climate change. Cambridge University Press
- IPCC (2003) Intergovernmental Panel on Climate Change. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama
- Jackson JE, Palmer JW (1980) A Computer Model Study of Light Interception by orchards in relation to mechanised harvesting and management. Sci Hortic (Amsterdam) 13:1–7.
- Jamar L, Lateur M (2009) Protection contre la tavelure du pommier ciblée sur les infections primaires en production biologique. In: Journées Techniques Nationales Fruits & Légumes Biologiques. Paris,
- Jamar L, Mostade O, Huyghebaert B, Pigeon O, Lateur M (2010) Comparative performance of recycling tunnel and conventional sprayers using standard and drift-mitigating nozzles in dwarf apple orchards. Crop Prot 29:561–566.
- Jensen E, Peoples M, Boddey R, Gresshoff P, Henrik H, Alves B, Morrison M (2012) Legumes for

- mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron Sustain Dev* 32:329–364. doi: 10.1007/s13593-011-0056-7
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT (2003) DSSAT Cropping System Model.
- Keating B, Carberry P, Hammer G, Probert M, Robertson M, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves J, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K, Asseng S, Chapman S, McCown R, Freebairn D, Smith C (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur J Agron* 18:267–288. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Kelkar S, Dolan K (2012) Modeling the effects of initial nitrogen content and temperature on fermentation kinetics of hard cider. *J Food Eng* 109:588–596. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.020
- Kilili A, Behboudian M, Mills T (1996a) Composition and quality of “Braeburn” apples under reduced irrigation. *Sci Hortic (Amsterdam)* 67:1–11. doi: 10.1016/S0304-4238(96)00939-9
- Kilili AW, Behboudian MH, Mills TM (1996b) Postharvest performance of “Braeburn” apples in relation to withholding of irrigation at different stages of the growing season. *J Hortic Sci* 71:693–701. doi: 10.1080/14620316.1996.11515449
- King R (1966) Wildlife and man. *NY Conserv* 20:8–11.
- Klages K, Donnison H, Wünsche J, Boldingh H (2001) Diurnal changes in non-structural carbohydrates in leaves, phloem exudate and fruit in “Braeburn” apple. *Funct Plant Biol* 28:131–139.
- Klein I, Levin I, Assaf R, Berkovitz A (1989) Drip nitrogen fertigation of ‘ Starking Delicious ’ apple trees. *Plant Soil* 119:305–314. doi: 10.1007/BF02370423
- Knight A (2010) Increased catch of female codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in kairomone-baited clear delta traps. *Environ Entomol* 39:83–90.
- Koké É, Biargues M-È, Sagnes J-LJ-L, Loquet B, Westercamp P (2011) Protection des vergers de pommiers contre les lépidoptères : lutte mécanique avec filets. *Infos CTIFL* 270:40–45.
- Koutinas N, Pepelyankov G, Lichev V (2010) Flower induction and flower bud development in apple and sweet cherry. *Biotechnol Biotechnol Equip* 24:1549–1558. doi: 10.2478/V10133-010-0003-9

- Kragt ME, Robertson MJ (2014) Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices. *Ecol Econ* 102:147–157. doi: 10.1016/j.ecolecon.2014.04.001
- Kramer S, Reganold J, Glover J, Bohannan B, Mooney H (2006) Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103:4522–4527. doi: 10.1073/pnas.0600359103
- Kremen C, Williams N, Aizen M, Gemmill-Herren B, LeBuhn G, Minckley R, Packer L, Potts S, Roulston T, Steffan-Dewenter I, Vázquez D, Winfree R, Adams L, Crone E, Greenleaf S, Keitt T, Klein A, Regetz J, Ricketts T (2007) Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecol Lett* 10:299–314. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01018.x
- Krieger D (2001) The Economic Value of Forest Ecosystem Services : A Review. *Wilderness Soc.* 1–31.
- Kucheryava N, Fiss M, Auling G, Kroppenstedt RM (1999) Isolation and characterization of epiphytic bacteria from the phyllosphere of apple, antagonistic in vitro to *Venturia inaequalis*, the causal agent of apple scab. *Syst Appl Microbiol* 22:472–478.
- Kuhn BF, Andersen TT, Pedersen HL (2003) Evaluation of 14 old unsprayed apple varieties. *Biol Agric Hortic* 20:301–310.
- La France Agricole (2010) De l'argile pour protéger les arbres fruitiers. In: La Fr. Agric. <http://www.lafranceagricole.fr/article/de-l-argile-pour-proteger-les-arbres-fruitiers-1,0,46160472.html>.
- Lacey LA, Arthurs SP, Unruh TR, Headrick H, Fritts R (2006) Entomopathogenic nematodes for control of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in apple and pear orchards: Effect of nematode species and seasonal temperatures, adjuvants, application equipment, and post-application irrigation. *Biol Control* 37:214–223. doi: 10.1016/j.biocontrol.2005.09.015
- Ladurner E, Recla L, Wolf M, Zelger R, Burgio G (2004) *Osmia cornuta* (Hymenoptera Megachilidae) densities required for apple pollination: a cage study. *J Apic Res* 43:118–122. doi: 10.1080/00218839.2004.11101121
- Laget E, Guadagnini M, Plénet D, Simon S, Assié G, Billote B, Borioli P, Bourguoin B, Fratantuono M, Guérin A, Hucbourg B, Lemarquand A, Loquet B, Mercadal M, Parveaud C, Ramade L, Rames M-H, Ricaud V, Rousselou C, Sagnes J-L, Zavagli F (2015) Guide pour la conception de systèmes de

production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques. Paris

Lakso A, Grappadelli LC, Barnard J, Goffinet M (1995) An expolinear model of the growth pattern of the apple fruit. *J. Hortic. Sci.* 70:389–394.

Lakso A, Wünsche J, Palmer J, Corelli Grappadelli L (1999) Measurement and Modeling of Carbon Balance of the Apple tree. *Hortscience* 34:1040–1047.

Lakso AN (2003) Water relations of apples. In: Ferree D, Warrington IJ (eds) *Apples: botany, production and uses*. CABI, Wallingford, pp 167–194

Launay M, Brisson N, Satger S, Hauggaard-Nielsen H, Corre-Hellou G, Kasynova E, Ruske R, Jensen ES, Gooding MJ (2009) Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *Eur J Agron* 31:85–98. doi: 10.1016/j.eja.2009.04.002

Launay M, Flenet F, Ruget F, Garcia de Cortazar Atauri I (2005) Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. In: Séminaire STICS, Carry-le-Rouet. pp 55–57

Lauri P (2002) From tree architecture to tree training - an overview of recent concepts developed in apple in France. *J Korean Soc Hortic Sci* 43:782–788.

Lauri PÉ, Costes E, Regnard JL, Brun L, Simon S, Monney P, Sinoquet H (2009) Does knowledge on fruit tree architecture and its implications for orchard management improve horticultural sustainability? An overview of recent advances in the apple. *Acta Hortic* 817:243–250. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.817.25

Le Roux X, Barbault R, Baudry J, Burel F, Doussa I, Garnier E, Herzog F, Lavorel S, Lifran R, Estrade JR-, Sarthou JP, Trommetter M (2008) Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport. In: INRA. <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Agriculture-et-biodiversite>.

Lemaire G, Gastal F (1997) N Uptake and Distribution in Plant Canopies. In: Lemaire G (ed) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 3–43

Lescourret F, Blecher N, Habib R, Chadoeuf J, Agostini D, Pailly O, Vaissière B, Poggi I (1999) Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management. *Agric Syst* 59:215–239. doi: 10.1016/S0308-521X(99)00006-2

Lescourret F, Magda D, Richard G, Adam-Blondon A, Bardy M, Baudry J, Doussan I, Dumont B, Lefèvre

- F, Litrico I, Martin-Clouaire R, Montuelle B, Pellerin S, Plantegenest M, Tancoigne E, Thomas A, Guyomard H, Soussana J (2015) A social–ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Curr Opin Environ Sustain* 14:68–75. doi: 10.1016/j.cosust.2015.04.001
- Lescourret F, Moitrier N, Valsesia P, Génard M (2010) QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees* 25:519–530. doi: 10.1007/s00468-010-0531-9
- Lescourret F, Poncet C, Simon S (2016) Insights in the ecological control of pests in horticulture. *Acta Hortic* 1137:91–104. doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1137.14
- Lespinnasse Y, Durel C., Parisi L, Laurens F, Chevalier M, C. Pinet (2000) An European project: D.A.R.E. - Durable Apple Resistance in Europe (FAIR CT97-3898) Durable resistance of apple to scab and powdery-mildew: one step more towards an environmental friendly orchard. *IOBC/WPRS Bull* 23:257–260.
- Lô-Pelzer E (2008) Modelling the effects of cropping systems and their spatial distribution on phoma stem canker on Winter OilSeed Rape and the adaptation of fungal pathogen populations responsible for the disease (*Leptosphaeria maculans*) to cultivar resistances. PhD Thes. Agroparistech
- Loewy R, Carvajal L, Novelli M, Pechen de D'Angelo A (2003) Effect of Pesticide Use in Fruit Production Orchards on Shallow Ground Water. *J Environ Sci Heal Part B* 38:317–325.
- Losey J, Vaughan M (2006) The Economic Value of Ecological Services Provided by Insects. *Bioscience* 56:311–323.
- Luyssaert S, Inglima I, Jung M, Richardson A, Reichstein M, Papale D, Piao S, Schulze E, Wingate L, Matteucci G (2007) CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Glob Chang Biol* 13:2509–2537. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x
- Ma L, Hou C, ZHANG X, Li H, Han D, Wang Y (2013) Seasonal Growth and Spatial Distribution of Apple Tree Roots on Different Rootstocks or Interstems. *J Am Soc Hortic Sci* 138:79–87.
- MAAF (2014) Enquête pratiques phytosanitaires en arboriculture. *Agreste les Dossiers* 22:1–17.
- Maalouly M, Franck P, Bouvier JC, Toubon JF, Lavigne C (2013) Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels. *Agric Ecosyst Environ* 169:33–42. doi: 10.1016/j.agee.2013.02.008

- Maalouly M, Franck P, Lavigne C (2015) Temporal dynamics of parasitoid assemblages parasitizing the codling moth. *Biol Control* 82:31–39. doi: 10.1016/j.biocontrol.2014.11.013
- MacHardy WE (1996) *Apple Scab Biology*. APS Press St. Paul
- Maes J, Liqueste C, Teller A, Erhard M, Paracchini ML, Barredo JI, Grizzetti B, Cardoso A, Somma F, Petersen JE, Meiner A, Gelabert ER, Zal N, Kristensen P, Bastrup-Birk A, Biala K, Piroddi C, Egoh B, Degeorges P, Fiorina C, Santos-Martín F, Naruševičius V, Verboven J, Pereira HM, Bengtsson J, Gocheva K, Marta-Pedroso C, Snäll T, Estreguil C, San-Miguel-Ayán J, Pérez-Soba M, Grêt-Regamey A, Lillebø AI, Malak DA, Condé S, Moen J, Czúcz B, Drakou EG, Zulian G, Laval C (2016) An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosyst Serv* 17:14–23. doi: 10.1016/j.ecoser.2015.10.023
- Makowski D, Hillier J, Wallach D, Andrieu B, Jeuffroy MH (2006) Parameter estimation for crop models. In *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*.
- Mantha S, Audette M (2011) Réseau d'essais de cultivars et de porte-greffes de pommiers. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ)
- MAPAQ, MDDEP, MSSS, UPA (2011) *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021*, Ministère. Gouvernement du Québec
- Marliac G, Simon S, Mazzia C, Penvern S, Lescourret F, Capowiez Y (2015) Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol. *BioControl* 60:805–815. doi: 10.1007/s10526-015-9687-y
- Mathieu V, Lavoisier C, Ferre G (2011) *L'éclaircissage du pommier*. Editions Ctifl, Paris
- Matson P, Billow C, Hall S, Zachariassen J (1996) Fertilization practices and soil variations control nitrogen oxide emissions from tropical sugar cane. *J Geophys Res* 101:533–545. doi: 10.1029/96JD01536
- MEA (2005) Ecosystems and their services. In: *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington DC, pp 49–70
- Memmah M, Lescourret F, Yao X, Lavigne C (2015) Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. *Agron Sustain Dev* 35:975–998. doi: 10.1007/s13593-015-0303-4

- Merwin IA, Stiles WC, van Es HM (1994) Orchard groundcover management impacts on soil physical properties. *J Am Soc Hortic Sci* 119:216–222.
- Meylan L, Merot A, Gary C, Rapidel B (2013) Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: The case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Agric Syst* 118:52–64. doi: 10.1016/j.agsy.2013.02.002
- Mills TM, Behboudian MH, Tan PY, Clothier BE (1994) Plant water status and fruit quality in Braeburn apples. *HortScience* 29:1274–1278.
- Mills WD, LaPlante AA (1951) Diseases and insects in the orchard. In: Cornell Extension Bulletin.
- Miñarro M, Hemptinne J-L, Dapena E (2005) Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea*: sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl* 50:403–414.
- Miñarro M, Prida E (2013) Hedgerows surrounding organic apple orchards in north-west Spain: Potential to conserve beneficial insects. *Agric For Entomol* 15:382–390. doi: 10.1111/afe.12025
- Monteiro L, Lavigne C, Ricci B, Frank P, Toubon J, Sauphanor B (2013) Predation of codling moth eggs is affected by pest management practices at orchard and landscape levels. *Agric Ecosyst Environ* 166:86–93. doi: 10.1016/j.agee.2011.10.012
- Morel M, Chouinard G, Bellerose S (2013) Méthodes alternatives de protection des pommiers. In: Nature-Action Québec. <http://nature-action.qc.ca/site/realisation/guide-pomiculture>.
- Mottes C, Lesueur-Jannoyer M, Le Bail M, Malézieux E (2014) Pesticide transfer models in crop and watershed systems: A review. *Agron Sustain Dev* 34:229–250. doi: 10.1007/s13593-013-0176-3
- Mpelasoka BS, Behboudian MH, Green SR (2001) Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: Responses to deficit irrigation and to crop load. *Irrig Sci* 20:107–113. doi: 10.1007/s002710100041
- Murtagh F, Legendre P (2014) Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method : Which Algorithms Implement Ward ' s Criterion ? *J Classif* 31:274–295. doi: 10.1007/s00357-
- Muscolo A, Panuccio MR, Mallamaci C, Sidari M (2014) Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecol Indic* 45:416–423.

- Myrold DD (1990) Measuring Denitrification in Soils Using ^{15}N Techniques. In: Revsbech NP, Sørensen J (eds) Denitrification in Soil and Sediment. Springer US, Boston, MA, pp 181–198
- Naschitz S, Naor A, Genish S, Wolf S, Goldschmidt E (2010) Internal management of non-structural carbohydrate resources in apple leaves and branch wood under a broad range of sink and source manipulations. *Tree Physiol* 30:715–727. doi: 10.1093/treephys/tpq028
- Neilsen D, Neilsen GH (2002) Efficient use of nitrogen and water in high-density apple orchards. *Horttechnology* 12:19–25.
- Neilsen GH, Neilsen D (2003) Nutritional requirements of apple. In: Ferree DC, Warrington IJ (eds) Apples: botany, production and uses. CABI, Wallingford, pp 267–302
- Neilsen GH, Parchomchuk P, Neilsen D, Zebarth BJ (2000) Drip-fertigation of apple trees affects root distribution and development of K deficiency. *Can J Soil Sci* 80:353–361.
- Nelson E, Polasky S, Lewis DJ, Plantinga AJ, Lonsdorf E, White D, Bael D, Lawler JJ (2008) Efficiency of incentives to jointly increase carbon sequestration and species conservation on a landscape. *Proc Natl Acad Sci U S A* 105:9471–6. doi: 10.1073/pnas.0706178105
- Nesme T, Lescourret F, Bellon S, Habib R (2009) A modelling approach to explore nitrogen fertilisation practices of growers and their consequences in apple orchards. *Agric Syst* 99:76–85. doi: 10.1016/j.agry.2008.09.004
- Nicholls C, Altieri M (2013) Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agron Sustain Dev* 33:257–274. doi: 10.1007/s13593-012-0092-y
- Nojonen MR a, Healey JR, Soto G, Haggard JP (2013) Sink or source-The potential of coffee agroforestry systems to sequester atmospheric CO_2 into soil organic carbon. *Agric Ecosyst Environ* 175:60–68. doi: 10.1016/j.agee.2013.04.012
- Olcott-Reid B, Sutton TB, Unrath C (1981) Evaporative cooling irrigation influences disease, insect, and mite pests of “Delicious” apples. *J Am Soc Hortic Sci* 106:469–474.
- Oliveira M, Merwin I (2001) Soil physical conditions in a New York orchard after eight years under different groundcover management systems. *Plant Soil* 234:233–237. doi: 10.1023/A:1017992810626
- Ould-Sidi M, Lescourret F (2011) Model-based design of integrated production systems: a review.

- Page G, Kelly T, Minor M, Cameron E (2011) Modeling carbon footprints of organic orchard production systems to address carbon trading: An approach based on life cycle assessment. *HortScience* 46:324–327.
- Palmer JW, Avery DJ, Wertheim SJ (1992) Effect of apple tree spacing and summer pruning on leaf area distribution and light interception. *Sci Hortic (Amsterdam)* 52:303–312. doi: 10.1016/0304-4238(92)90031-7
- Palmer JW, Privé JP, Tustin DS (2003) Temperature. In: *Apples: botany, production and uses*. CABI, Wallingford, pp 217–236
- Parisi L, Gros C, Combe F, Parveaud CE, Gomez C, Brun L (2013) Impact of a cultivar mixture on scab, powdery mildew and rosy aphid in an organic apple orchard. *Crop Prot* 43:207–212. doi: 10.1016/j.cropro.2012.09.014
- Parisi L, Lespinasse Y, Guillaume J, Krüger J, Guillaumes J, Krüger J (1993a) A New Race of *Venturia inaequalis* Virulent to Apples with Resistance due to the Vf Gene. *Phytopathology* 83:533–537. doi: 10.1094/Phyto-83-533
- Parisi L, Lespinasse Y, Guillaume J, Krüger J, Guillaumes J, Krüger J (1993b) A new race of *Venturia inaequalis* virulent to apples with resistance due to the Vf gene. *Am Phytopathol Soc* 83:533–537. doi: 10.1094/Phyto-83-533
- Parolin P, Bresch C, Desneux N, Brun R, Bout A, Boll R, Poncet C (2012) Secondary plants used in biological control: A review. *Int J Pest Manag* 58:91–100. doi: 10.1080/09670874.2012.659229
- Pasquier D (1997) Lutte biologique contre le carpocapse *Cydia pomonella* au moyen de *Bacillus thuringiensis* (BT) : du laboratoire au verger. *Rev suisse Vitic Arboric Hortic* 29:233–238.
- Peck G, Andrews P, Reganold J, Fellman J (2006) Apple orchard productivity and fruit quality under organic, conventional, and integrated management. *HortScience* 41:99–107.
- Pekár S (1999) Effect of IPM practices and conventional spraying on spider population dynamics in an apple orchard. *Agric Ecosyst Environ* 73:155–166. doi: 10.1016/S0167-8809(99)00024-9
- Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, Moonen C, Vasileiadis V, Guérin D, Guichard L, Reau R, Messéan A (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative

- multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecol Indic* 18:171–182. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.11.019
- Pfiffner L, Scharer H, Luka H (2013) Functional biodiversity to improve pest control in organic cropping systems. In: Korean Organic Conference, 25th October. Suwon, Korea,
- Pimentel D (2005) Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States In *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*. *Environ Dev Sustain* 7:229–252. doi: 10.1007/978-1-4020-8992-3_4
- Pistocchi A, Bouraoui F, Bittelli M (2008) A simplified parameterization of the monthly topsoil water budget. *Water Resour Res* 44:0. doi: 10.1029/2007WR006603
- Poisson A (2013) Analyse de gènes potentiellement impliqués dans la résistance basale du pommier à *Venturia inaequalis*. Mémoire de fin d'étude. Agrocampus Ouest. Angers, France
- Power AG (2010) Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 365:2959–2971. doi: 10.1098/rstb.2010.0143
- Provost C, Valéro J, Vincent C, Rasamimanana H (2008) Viral insecticide registered for codling moth control in Canada. *Fruit Veg Mag* 24–25.
- Puterka GJ, Glenn DM, Sekutowski DG, Unruh TR, Jones SK (2000) Progress Toward Liquid Formulations of Particle Films for Insect and Disease Control in Pear. *Environ Entomol* 29:329–339.
- Quiñones A, Martínez-Alcántara B, Legaz F (2007) Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. *Agric Ecosyst Environ* 122:399–409. doi: 10.1016/j.agee.2007.02.004
- Racskó J (2006) Crop Load , Fruit Thinning and their Effects on Fruit Quality of Apple (*Malus domestica* Borkh .). *J Agric Sci* 24:29–35.
- Raese J (1998) Response of apple and pear trees to nitrogen , phosphorus , and potassium fertilizers. *J Plant Nutr* 21:2671–2696. doi: 10.1080/01904169809365597
- Rapidel B, Ripoché A, Allinne C, Metay A, Deheuvels O, Lamanda N, Blazy J-M, Valdés-Gómez H, Gary C (2015) Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agron Sustain Dev* 35:0. doi: 10.1007/s13593-015-0317-y

- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2012) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. *Agron Sustain Dev* 32:273–303. doi: 10.1007/s13593-011-0022-4
- Reganold JP, Glover JD, Andrews PK, Hinman HR (2001) Sustainability of three apple production systems. *Nature* 410:926–930. doi: 10.1038/nature05188
- Reid W, Mooney H, Cropper A, Capistrano D, Carpentier S, Chopra K, Dasgupta P, Dietz T, Duraiappah A, Hassan R, Kasperson R, Leemans R, May R, McMichael A, Pingali P, Samper C, Scholes R, Watson R, Zakri A, Shidong Z, Ash N, Bennett J, Kumar P, Lee M, Raudsepp-Hearne C, Simons H, Thonell J, Zurek N (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Millenium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington DC
- Ricard J-M, Garcin A, Jay M, Mandrin J-F (2012) *Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière*. Editions Ctifl, Paris
- Ricketts T, Regetz, Steffan-Dewenter I, Cunningham S, Kremen C, Bogdanski A, Gemmill-Herren B, Greenleaf S, Klein A, Mayfield M, Morandin L, Ochieng A, Viana B (2008) Landscape effects on crop pollination services: Are there general patterns? *Ecol Lett* 11:499–515. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x
- Ricou C, Schneller C, Amiaud B, Plantureux S, Bockstaller C (2014) A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. *Ecol Indic* 45:320–331. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.03.022
- Riga P, Charpentier S (1999) Simulation of nitrogen dynamics in an alluvial sandy soil with drip fertigation of apple trees. *Soil Use Manag* 15:34–40. doi: 10.1111/j.1475-2743.1999.tb00061.x
- Ripoche A, Rellier J, Martin-Clouaire R, Paré N, Biarnès A, Gary C (2011) Modelling adaptive management of intercropping in vineyards to satisfy agronomic and environmental performances under Mediterranean climate. *Environ Model Softw* 26:1467–1480. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.08.003
- Robertson M, Bathgate A, Moore A, Lawes R, Lilley J (2009) Seeking simultaneous improvements in farm profit and natural resource indicators: A modelling analysis. *Anim Prod Sci* 49:826–836. doi: 10.1071/AN09008
- Robin M, Colbach N, Lucas P, Montfort F, Cholez C, Debaeke P, Aubertot J (2013) Injury profile

- SIMulator, a Qualitative aggregative modelling framework to predict injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design of IPSIM-wheat-eyespot. PLoS One. doi: 10.1371/journal.pone.0075829
- Robinson DW, O’Kennedy ND (1978) The effect of the overall herbicide systems of soil management on the growth and yield of apple trees “Golden Delicious.” *Sci Hortic (Amsterdam)* 9:127–136.
- Robinson T, Lakso A, Carpenter S (1991a) Canopy Development , Yield , and Fruit Quality of “ Empire ” and “ Delicious ” Apple Trees Grown in Four Orchard Production Systems for Ten Years. 116:179–187.
- Robinson T, Lakso A, Ren Z (1991b) Modifying apple tree canopies for improved production efficiency. *HortScience* 26:1005–1012.
- Robinson T, Wünsche J, Lakso A (1993) The influence of orchards system and pruning severity on yield, light interception, conversion efficiency, partitioning index and leaf area index. *Acta Hortic* 349:123–128. doi: 10.17660/ActaHortic.1993.349.17
- Rodríguez-Entrena M, Barreiro-Hurlé J, Gómez-Limón J, Espinosa-Goded M, Castro-Rodríguez J (2012) Evaluating the demand for carbon sequestration in olive grove soils as a strategy toward mitigating climate change. *J Environ Manage* 112:368–376. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.004
- Rodríguez J, Beard T, Bennett E, Cumming G, Cork S, Agard J, Dobson A, Peterson G (2006) Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services. *Ecol Soc* 11:28.
- Romet L (2004) Le point sur la stratégie de lutte automnale contre le puceron cendré du pommier. *AlterAgri* 14–18.
- Rosa García R, Miñarro M (2014) Role of floral resources in the conservation of pollinator communities in cider-apple orchards. *Agric Ecosyst Environ* 183:118–126. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.017
- Rousselin A, Sauge M, Jordan M, Vercambre G, Lescourret F, Bevacqua D (2016) Nitrogen and water supplies affect peach tree-green peach aphid interactions: the key role played by vegetative growth. *Agric For Entomol*. doi: 10.1111/afe.12168
- Ruget F, Brisson N, Delécolle R, Faivre R (2002) Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22:133–158. doi: 10.1051/agro

- Rusch A, Valantin-Morison M, Sarthou JP, Roger-Estrade J (2010) Biological control of insect pests in agroecosystems. Effects of crop management, farming systems, and seminatural habitats at the landscape scale: A review. In: *Advances in Agronomy*. Elsevier Ltd, pp 219–259
- Sabatier R, Lebreton JD, Chessel D (1989) Principal component analysis with instrumental variables as a tool for modeling composition data. In: Coppi, R., Bolasco S (Eds. . (ed) *Multiway Data Analysis*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p 341
- Sadok W, Angevin F, Bergez J-E, Bockstaller C, Colomb B, Guichard L, Reau R, Messéan A, Doré T (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agron Sustain Dev* 29:447–461. doi: 10.1051/agro/2009006
- Saffih-Hdadi K, Mary B (2008) Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biol Biochem* 40:594–607. doi: 10.1016/j.soilbio.2007.08.022
- Sagoff M (2011) The quantification and valuation of ecosystem services. *Ecol Econ* 70:497–502. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.10.006
- Samietz J, Graf B, Höhn H, Schaub L, Höpli HU (2007) Phenology modelling of major insect pests in fruit orchards from biological basics to decision support: the forecasting tool SOPRA. *EPPO Bull* 37:255–260. doi: 10.1111/j.1365-2338.2007.01121.x
- Samietz J, Höhn H (2010) Pour une lutte efficace et durable. Le Carpocapse. *Rev UFA* 10:54–55–59.
- Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R (2010) Organic agriculture and ecosystem services. *Environ Sci Policy* 13:1–7. doi: 10.1016/j.envsci.2009.11.002
- Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R, Case B (2008) The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach. *Ecol Econ* 64:835–848. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.05.007
- Sanon S, Hein T, Douven W, Winkler P (2012) Quantifying ecosystem service trade-offs: The case of an urban floodplain in Vienna, Austria. *J Environ Manage* 111:159–172. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.06.008
- Sauge MH, Grechi I, Poëssel JL (2010) Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: Vegetative growth allocation or chemical defence? *Entomol Exp Appl* 136:123–133. doi: 10.1111/j.1570-7458.2010.01008.x

- Sauphanor B, Simon S, Boisneau C, Capowiez Y, Rieux R, Bouvier JC, Defrance H, Picard C, Toubon JF (2009) Protection phytosanitaire et biodiversité en agriculture biologique. Le cas des vergers de pommiers. *Innov Agron* 7 (2009), 153-163 7:217–228.
- Saure M (1990) External control of anthocyanin formation in apple. *Sci Hortic (Amsterdam)* 42:181–218. doi: 10.1016/0304-4238(90)90082-P
- Schäckermann J, Pufal G, Mandelik Y, Klein A (2015) Agro-ecosystem services and dis-services in almond orchards are differentially influenced by the surrounding landscape. *Ecol Entomol* 40:12–21. doi: 10.1111/een.12244
- Schellhorn NA, Parry HR, Macfadyen S, Wang Y, Zalucki MP (2015) Connecting scales: Achieving in-field pest control from areawide and landscape ecology studies. *Insect Sci* 22:35–51. doi: 10.1111/1744-7917.12161
- Schipanski ME, Barbercheck M, Douglas MR, Finney DM, Haider K, Kaye JP, Kemanian AR, Mortensen DA, Ryan MR, Tooker J, White C (2014) A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agric Syst* 125:12–22. doi: 10.1016/j.agsy.2013.11.004
- Schmid A, Weibel F (2000) The Sandwich System, a procedure for herbicide free in-row weed control? *Obstbau* 25:214–217.
- Seppelt R, Dormann CF, Eppink F V, Lautenbach S, Schmidt S (2011) A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *J Appl Ecol* 48:630–636. doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x
- Seppelt R, Fath B, Burkhard B, Fisher J, Grêt-Regamey A, Lautenbach S, Pert P, Hotes S, Spangenberg J, Verburg P, Van Oudenhoven A (2012) Form follows function? Proposing a blueprint for ecosystem service assessments based on reviews and case studies. *Ecol Indic* 21:145–154. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.09.003
- Seppelt R, Lautenbach S, Volk M (2013) Identifying trade-offs between ecosystem services, land use, and biodiversity: a plea for combining scenario analysis and optimization on different spatial scales. *Curr Opin Environ Sustain* 5:458–463. doi: 10.1016/j.cosust.2013.05.002
- Serrurier M (2013a) Marché de la pomme. *Infos CTIFL* 293:10–16.
- Serrurier M (2013b) Structure des exploitations fruitières et légumières: évolutions entre les recensements agricoles de 2000 et 2010. *Agreste les Dossiers* 16:104.

- Simon S, Bouvier J, Debras J, Sauphanor B (2010) Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agron Sustain Dev* 30:139–152. doi: 10.1051/agro/2009013
- Simon S, Lauri P-EP, Brun L, Defrance H, Sauphanor B (2006) Does fruit-tree architecture manipulation affect the development of pests and pathogens? *J Hortic Sci Biotechnol* 81:765–773.
- Simon S, Marliac G, Capowiez Y (2015) Quelles pratiques agroécologiques pour contrôler les bioagresseurs dans un système pérenne, le verger de pommiers ? *Innov Agron* 43:29–40. doi: 10.1111/j.1439-0310.2008.01526.x
- Simon S, Morel K, Durand E, Brevalle G, Girard T, Lauri P (2012) Aphids at crossroads: When branch architecture alters aphid infestation patterns in the apple tree. *Trees - Struct Funct* 26:273–282. doi: 10.1007/s00468-011-0629-8
- Six J, Freyn S. D., Thietn R. K., Batten K (2006) Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci Soc Am J* 70:555. doi: 10.2136/sssaj2004.0347
- Slatnar A, Stampar F, Veberic R (2012) Influence of bicarbonate salts, used against apple scab, on selected primary and secondary metabolites in apple fruit and leaves. *Sci Hortic (Amsterdam)* 143:197–204.
- Sofo A, Nuzzo V, Palese A, Xiloyannis C, Celano G, Zukowskyj P, Dichio B (2005) Net CO₂ storage in mediterranean olive and peach orchards. *Sci Hortic (Amsterdam)* 107:17–24. doi: 10.1016/j.scienta.2005.06.001
- Sokalska DI, Haman DZ, Szewczuk A, Sobota J, Deren D (2009) Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system. *Agric Water Manag* 96:917–924. doi: 10.1016/j.agwat.2008.12.003
- Song B, Wu H, Kong Y, Zhang J, Du Y, Hu J, Yao Y (2010) Effects of intercropping with aromatic plants on the diversity and structure of an arthropod community in a pear orchard. *BioControl* 55:741–751. doi: 10.1007/s10526-010-9301-2
- Souty M, Génard M, Reich M, Albagnac G (1999) Effect of assimilate supply on peach fruit maturation and quality. *Can J Plant Sci* 79:259–268.
- Stern R a., Eisikowitch D, Dag a. (2001a) Sequential introduction of honeybee colonies and doubling their density increases cross-pollination, fruit-set and yield in “Red Delicious” apple. *J Hortic Sci*

Biotechnol 76:17–23.

Stern RA, Eisikowitch D, Dag A (2001b) Sequential introduction of honeybee colonies and doubling their density increases cross-pollination, fruit-set and yield in “Red Delicious” apple. J Hortic Sci Biotechnol 76:17–23.

Stewart-Jones A, Pope TW, Fitzgerald JD, Poppy GM (2008) The effect of ant attendance on the success of rosy apple aphid populations, natural enemy abundance and apple damage in orchards. Agric For Entomol 10:37–43. doi: 10.1111/j.1461-9563.2007.00353.x

Stockle CO, Donatelli M, Nelson R (2003) CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur J Agron 18:289–307. doi: Pii S1161-0301(02)00109-0

Stopar M, Bolcina U, Vanzo A, Vrhovsek U (2002) Lower crop load for cv. Jonagold apples (*Malus x domestica* Borkh.) increases polyphenol content and fruit quality. J Agric Food Chem 50:1643–1646. doi: 10.1021/jf011018b

Strullu L, Beaudoin N, de Cortàzar Atauri IG, Mary B (2014) Simulation of Biomass and Nitrogen Dynamics in Perennial Organs and Shoots of *Miscanthus x Giganteus* Using the STICS Model. BioEnergy Res 7:1253–1269. doi: 10.1007/s12155-014-9462-4

Susfalk RB, Johnson DW (2002) Ion exchange resin based soil solution lysimeters and snowmelt solution collectors. Commun Soil Sci Plant Anal 33:1261–1275. doi: 10.1081/CSS-120003886

Swinton S, Lupi F, Robertson G, Hamilton S (2007) Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. Ecol Econ 64:245–252. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.09.020

Sykes SR (2008) The effect on *Citrus* fruit of excluding pollinating insects at flowering and implications for breeding new seedless cultivars. J Hortic Sci Biotechnol 83:713–718. doi: 10.1080/14620316.2008.11512449

Syswerda SP, Robertson GP (2014) Ecosystem services along a management gradient in Michigan (USA) cropping systems. Agric Ecosyst Environ 189:28–35. doi: 10.1016/j.agee.2014.03.006

Tagliavini M, Scudellazi D, Marangoni B, Toselli M (1996) Nitrogen fertilization management in orchards to reconcile productivity and environmental aspects. Fertil Res 43:93–102. doi: 10.1007/BF00747687

- Tagliavini M, Tonon G, Scandellari F, Quiñones A, Palmieri S, Menarbin G, Gioacchini P, Masia A (2007) Nutrient recycling during the decomposition of apple leaves (*Malus domestica*) and mowed grasses in an orchard. *Agric Ecosyst Environ* 118:191–200. doi: 10.1016/j.agee.2006.05.018
- Tancoigne E, Barbier M, Cointet J, Richard G (2014) The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services. *Ecosyst Serv* 10:35–48. doi: 10.1016/j.ecoser.2014.07.004
- Taylor JA, Praat JP, Bollen AF (2007) Spatial variability of kiwifruit quality in orchards and its implications for sampling and mapping. *HortScience* 42:246–250.
- Teravest D, Smith J, Carpenter-Boggs L, Granatstein D, Hoagland L, Reganold J (2011) Soil carbon pools, nitrogen supply, and tree performance under several groundcovers and compost rates in a newly planted apple orchard. *HortScience* 46:1687–1694.
- Thiel A, Schleyer C, Plieninger T (2012) Wolves are Mobile, While Fruit Trees are not! How Characteristics of Resources and Supranational Regulatory Frameworks Shape the Provision of Biodiversity and Ecosystem Services in Germany. *Environ Policy Gov* 22:189–204. doi: 10.1002/eet.1578
- Thies C (1999) Landscape Structure and Biological Control in Agroecosystems. *Science* (80-) 285:893–895. doi: 10.1126/science.285.5429.893
- Thompson H (2003) Behavioural effects of pesticides in bees -their potential for use in risk assessment. *Ecotoxicology* 12:317–330.
- Tiessen H, Stewart JWB (1988) Light and Electron-Microscopy of Stained Microaggregates - the Role of Organic-Matter and Microbes in Soil Aggregation. *Biogeochemistry* 5:312–322.
- Toselli M, Flore J, Zavalloni C, Marangoni B (2000) Nitrogen Partitioning in Apple Trees as Affected by Application Time. *Horttechnology* 10:136–141.
- Trandafirescu M, Trandafirescu I, Gavat C, Spita V (2004) Entomophagous complexes of some pests in apple and peach orchards in southeastern.
- Tribouillois H, Cohan J-P, Justes E (2016) Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. *Plant Soil* 401:347–364. doi: 10.1007/s11104-015-2734-8

- Tscharntke T, Bommarco R, Clough Y, Kleijn D, Rand TA, Tylianakis JM, Van Nouhuys S, Vidal S (2008) Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol Control* 238–253.
- Tsonkova P, Quinkenstein A, Böhm C, Freese D, Schaller E (2014) Ecosystem services assessment tool for agroforestry (ESAT-A): An approach to assess selected ecosystem services provided by alley cropping systems. *Ecol Indic* 45:285–299. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.04.024
- Vaissière B, Morison N, Crété X, Ferré G, Matti M, Vilain J (2000) Incidence des filets paragrêle sur les abeilles et la pollinisation des pommiers. *Arboric. Fruitière* 544:19–25.
- van Oudenhoven A, Petz K, Alkemade R, Hein L, de Groot R (2012) Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecol Indic* 21:110–122. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.01.012
- Vasseur C, Joannon A, Aviron S, Burel F, Meynard J, Baudry J (2013) The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agric Ecosyst Environ* 166:3–14. doi: 10.1016/j.agee.2011.10.012
- Veres A, Petit S, Conord C, Lavigne C (2013) Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agric Ecosyst Environ* 166:110–117. doi: 10.1016/j.agee.2011.05.027
- Volz R, Tustin D, Ferguson I (1996) Pollination effects on fruit mineral composition, seeds and cropping characteristics of “Braeburn” apple trees. *Sci Hortic (Amsterdam)* 66:169–180. doi: 10.1016/S0304-4238(96)00934-X
- Wallace K (2007) Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biol Conserv* 139:235–246. doi: 10.1016/j.biocon.2007.07.015
- Wallach D, Goffinet B, Bergeza JE, Debaeke P, Leenhardt D, Aubertot JN (2001) Parameter estimation for crop models. a new approach and application to a corn model. *Agron J* 93:757–766.
- White R (2006) Principles and practices of soil science: the soil as a natural resource - 4th Edition. Blackwell Publishing
- Willaume M, Lauri P, Sinoquet H (2004) Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation. *Trees - Struct Funct* 18:705–713. doi: 10.1007/s00468-004-0357-4
- Wu T, Wang Y, Yu C, Chiarawipa R, Zhang X, Han Z, Wu L (2012) Carbon sequestration by fruit trees -

- chinese apple orchards as an example. PLoS One 7:e38883. doi: 10.1371/journal.pone.0038883
- Wünsche J, Lakso A, Robinson T, Lenz F, Denning S (1996) The bases of productivity in apple production systems: the role of light interception by different shoot types. J Am Soc Hortic Sci 121:886–893.
- Wyss E (1995) The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in an apple orchard. Entomol Exp Appl 75:43–49. doi: 10.1111/j.1570-7458.1995.tb01908.x
- Xia G, Cheng L, Lakso A, Goffinet M (2009) Effects of Nitrogen Supply on Source-sink Balance and Fruit Size of “Gala” Apple Trees. J Am Soc Hortic Sci 134:126–133.
- Yang Q, Zhang F, Li F (2011) Effect of different drip irrigation methods and fertilization on growth, physiology and water use of young apple tree. Sci Hortic (Amsterdam) 129:119–126. doi: 10.1016/j.scienta.2011.03.019
- Yao X, Xu Y (2006) Recent advances in evolutionary computation. J Comput Sci Technol 21:1–18. doi: 10.1007/s11390-006-0001-4
- Yu DSK, Laing JE, Hagley EAC (1984) Dispersal of *Trichogramma* spp. (Hymenoptera : Trichogrammatidae) in a Apple Orchard After Inundative Releases. Environ Entomol 13:371–374.
- Zadoks JC (1985) On the conceptual basis of crop loss assessment: the threshold theory. Annu Rev Phytopathol 23:455–473. doi: 10.1071/APP9720008
- Zanotelli D, Montagnani L, Manca G, Scandellari F, Tagliavini M (2015) Net ecosystem carbon balance of an apple orchard. Eur J Agron 63:97–104. doi: 10.1016/j.eja.2014.12.002
- Zanotelli D, Montagnani L, Manca G, Tagliavini M (2013) Net primary productivity, allocation pattern and carbon use efficiency in an apple orchard assessed by integrating eddy covariance, biometric and continuous soil chamber measurements. Biogeosciences 10:3089–3108. doi: 10.5194/bg-10-3089-2013
- Zavagli F (2013) Protection des pommiers contre la tavelure : la bâche anti-pluie, un moyen innovant à l’étude. Infos Ctifl 289:22–29.
- Zavagli F, Verpont F, Giraud M, Favareille J (2014) Les bâches anti-pluie en verger de pommier. In: Rencontres phytosanitaires fruits à pépins Ctifl/SDQPV. CTIFL, Centre de Lanxade, France,

Zhang J (1993) Apple tree system research. Lincoln University

Zhang W, Ricketts T, Kremen C, Carney K, Swinton S (2007) Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecol Econ* 64:253–260. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.024

Zhu X, Burger M, Doane T, Horwath W (2013) Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N₂O and NO under low oxygen availability. *PNAS* 110:6328–6333.

Zibordi M, Domingos S, Corelli Grappadelli L (2009) Thinning apples via shading: an appraisal under field conditions. *J Hortic Sci Biotechnol* 84:138–144. doi: 10.1080/14620316.2009.11512611

ANNEXES CHAPITRE 2

Annexe 2.A : Performances des vergers				
	rendement (t/ha)	nombre fruits / arbre (à la récolte)	qualité (°Brix)	IFT (sans NODU vert)
Pu_CON2014	71	150	13.2	23.2
Pu_LI2014	45	350	13.8	16
Pu_LISR2014	35	259	12.5	6
Pu_CON2015	22	60	10.7	13.2
Pu_LI2015	13	80	11.9	8.7
Pu_LISR2015	17	121	12.5	5
Got_CON2015	73	360	15.7	24
Got_LI2015	57	340	14.2	22
Got_ORG2015	31	195	13.7	18

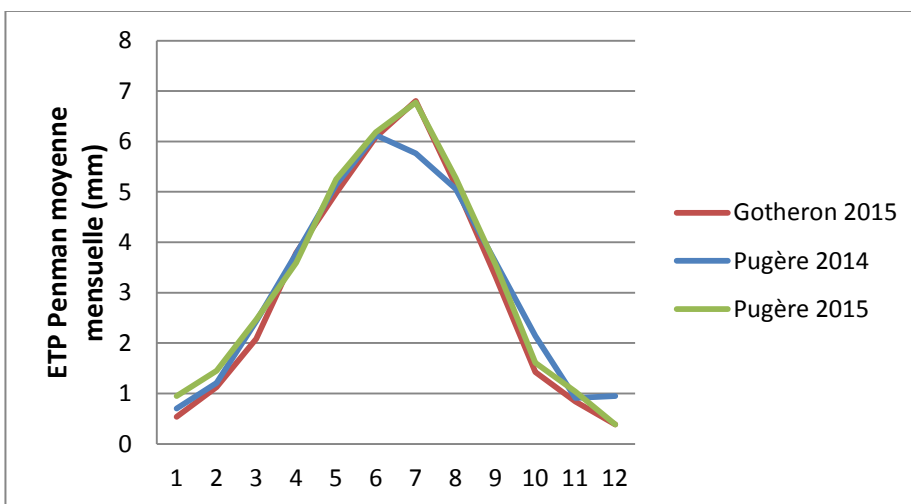
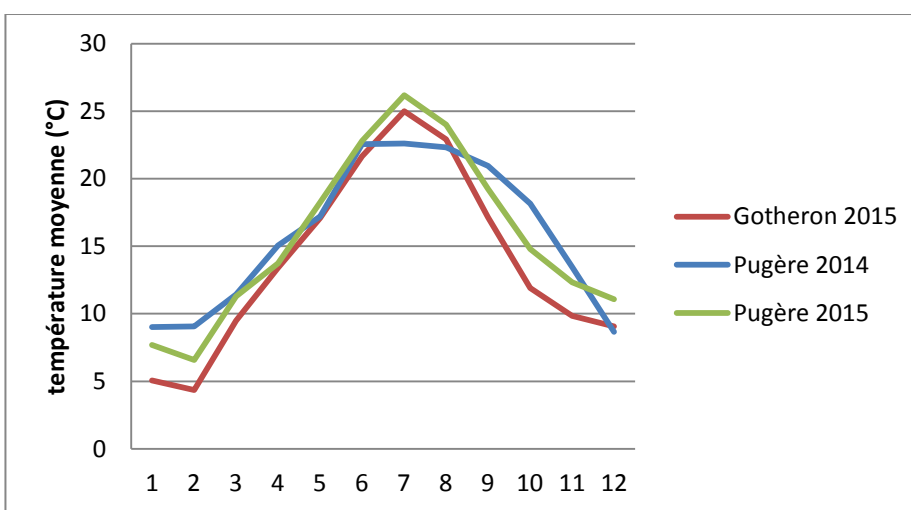
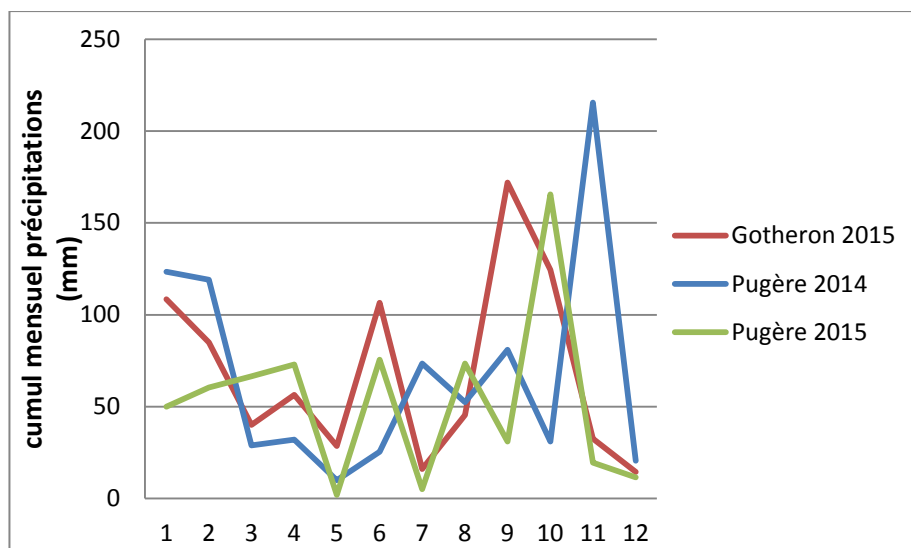
Annexe 2.B Gestion de la fertilisation sur le site de Gotheron en 2015						
Date	Produit	Dose en kg/ha	Dose l/ha	Got_ORG2015	Got_LI2015	Got_CON2015
10/02/2015	compost	4000		x	x	
07/04/2015	16-6-21	125			x	
07/04/2015	16-6-21	188				x
07/04/2015	farine de plume	200		x		
16/06/2015	16-6-21	188			x	x
04/06/2015	11,5-3-0,5	174		x		
24/09/2015	Vegethumus	909		x		

Annexe 2.C : Caractéristiques des sols												
	% argile	% limons grossiers	% limons fins	% sables grossiers	% sables fins	C/N	CaCO3 (%)	P2O5 (g/kg)	K2O (g/kg)	Corg (g/kg)	Ntotal (g/kg)	cailloux (%)
Pu_CON2014	20.5	24.9	23.9	0.8	21	9.5	41.4	0.158	0.135	13.3	1.4	0
Pu_LI2014	21.6	26	22.6	1.2	20.6	9.5	41.1	0.121	0.146	13.3	1.4	0
Pu_LISR2014	18.2	25	22.5	0.6	24.4	9.05	45.4	0.102	0.121	11.8	1.3	0
Got_CON2015	17.8	14.1	15.4	30.6	22.1	10.2	3	0.2	0.16	12.0	1.2	30 (granite morainique)
Got_LI2015	15.4					10.6	3	0.243	0.23	12.0	1.1	
Got_ORG2015	16.5	13.3	17.4	31.3	21.5	10.8	3	0.224	0.209	12.0	1.1	50 (granite morainique)

Annexe 2.D : Dégâts des bioagresseurs au cours de l'année sur le site de la Pugère en 2014					
		04/06/2014	18/06/2014	30/07/2014	19/08/2014
Pousses tavelées	Pu_CON2014		0.20%		
	Pu_LI2014	2.68%	0.00%		0.33%
Fruits piqués par carpocapse	Pu_CON2014	0.00%	0.20%	0.00%	0.00%
	Pu_LI2014	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Pu_LISR2014	0	0.00%	0.00%	0.00%
Fruits tavelés	Pu_CON2014				
	Pu_LI2014				
	Pu_LISR2014				
Rameaux infestés par puceron cendré	Pu_CON2014	0	0.20%	0.00%	0.70%
	Pu_LI2014	3.33	0.00%	0.00%	4.50%
	Pu_LISR2014	7.5	0.00%		

Annexe 2.E : Dégâts des bioagresseurs au cours de l'année sur le site de la Pugère en 2015						
		20/05/2015	04/06/2015	08/07/2015	29/07/2015	07/09/2015
Pousses tavelées	Pu_LI2015		7.4%			
	Pu_CON2015		6.0%	1.8%		
Fruits piqués par carpocapse	Pu_LISR2015		0.8%	0.0%	0.8%	
	Pu_LI2015		0.0%	0.0%	0.4%	1.2%
	Pu_CON2015		1.0%	1.2%	0.8%	0.8%
Fruits tavelés	Pu_LISR2015		0.0%	0.0%	0.0%	
	Pu_LI2015		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Pu_CON2015		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Rameaux infestés par puceron cendré	Pu_LISR2015	0.7%				
	Pu_LI2015	4.5%				
	Pu_CON2015	0.00%				

Annexe 2.F : Dégâts des bioagresseurs au cours de l'année sur le site de Gotheron en 2015									
		04/05/2015	18/05/2015	22/06/2015	06/07/2015	21/07/2015	27/07/2015	25/08/2015	03/09/2015
Pousses tavelées	Got_CON2015								
	Got_LI2015								
	Got_ORG2015								
Fruits piqués par carpocapse	Got_CON2015			0.00%	0.00%			0.00%	
	Got_LI2015				0.30%	0.30%	0.1	0.40%	0.00%
	Got_ORG2015			0.10%	0.20%	0.20%	0.10%	1.00%	0.80%
Fruits tavelés	Got_CON2015								
	Got_LI2015								
	Got_ORG2015								
Rameaux infestés par puceron cendré	Got_CON2015	0.00%	50.00%						
	Got_LI2015	2.00%	50.00%						
	Got_ORG2015	10.00%	0.00%						

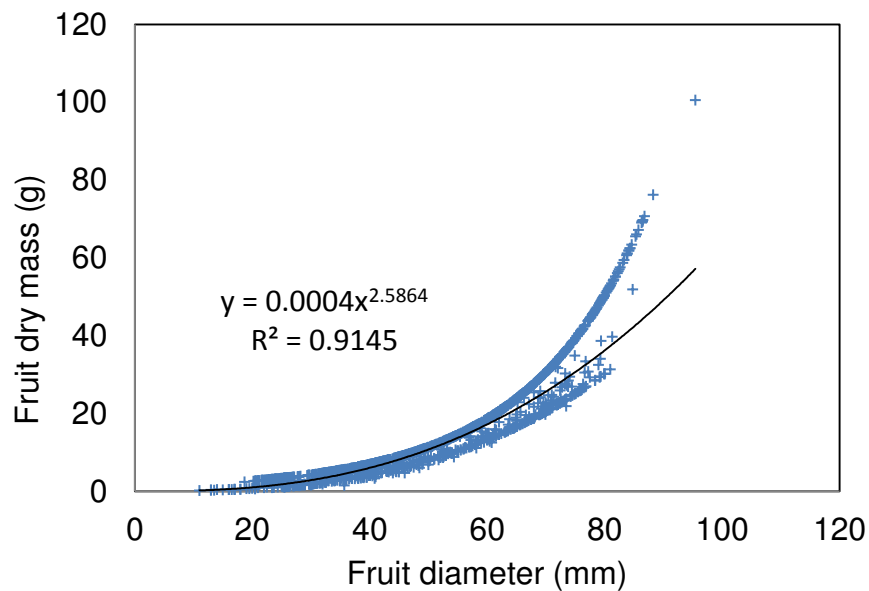


Annexe 2.G: Données climatiques en 2014 et 2015 pour le site 'La Pugère' et en 2015 pour le site de Gotheron. Les données sont des moyennes mensuelles pour la température (°C) et l'évapotranspiration (mm) et une somme des valeurs mensuelles pour les précipitations (mm)

ANNEXES CHAPITRE 3

Appendix 3.A : Gotheron and Pugère agricultural management for years 2014 and 2015			
<u>GOTHERON 2015</u>	ORG	LI	CON
	'organic'	'low input'	'conventional'
Training	Solaxe		
Fertilization	Organic : farm compost in winter, N + K in early spring (20 - 30 u N), commercial organic fertilizer mid-June (20 - 30 u N), feather flour in September (10 – 20 u N) Total : 85 u N	Organic / mineral : farm compost in winter, 20, 30 and 10 u N ammonium nitrate at budburst, mid-June and post-harvest Total : 70 u N	Mineral : 30 u N at budburst, 30 u N in May Total : 60 u N
Irrigation	Water balance through ETP. Tensiometer control : between 10 mm (3h) and 13 mm (4h) per irrigation water amount. Hyrological comfort with possible restrictions according to tree vigor.		
Irrigation water amounts (in mm/year)	227	237	243
Water excess (mm/year) (kc*ETP-rainfall- irrigation water)	198	208	214
Planting density	5mx2m		
<u>LA PUGERE</u>	LI	LISR	CON
2014-2015	'low input'	'low input with apple scab resistant cultivar	'conventional'

Training	Slender spindle (free form)		Solaxe
Fertilization	Mineral : calcium nitrate	none	Mineral : calcium nitrate
	18 u N (in 2014)	0 (in 2014)	36 u N (in 2014)
	0 u N (in 2015)	0 (in 2015)	0 (in 2015)
Irrigation	Water balance through ETP Pepista control and Watermark® capacitive probes - Hydrological comfort for 0-30 and 30-60 cm soil layers		
Irrigation water amounts (in mm/year)	287 (in 2014)	244 (in 2014)	243 (in 2014)
	273 (in 2015)	273 (in 2015)	340 (in 2015)
Water excess (mm/year) (kc*ETP- rainfall- irrigation water	235 (in 2014)	191(in 2014)	192 (in 2014)
	13 (in 2015)	13 (in 2015)	80 (in 2015)
Planting density	5mx2.5m	5mx2.5m	4mx1.25m



Appendix 3.B: Allometric relationship between fruit diameter and fruit dry mass on Golden cultivar in both Gotheron and Pugère sites in 2014 and 2015.

Appendix 3.C : STICS parameters for Golden cultivar apple orchards for “on-crop” years, their value and their origin as explained in 2.3.

Parameter	Value	Parameter origin	Description	Attached STICS module	Unit
abscission	1	directly measured in the field	fraction of senescent leaves falling to the soil	leaves	dimensionless
adens	-0.5	directly measured in the field	Interplant competition parameter - represents the ability to withstand increasing densities	leaves	dimensionless
adil	2.32	curve parameterization	parameter of the critical dilution curve $[N_{plante}] = \text{adil} \cdot MS^{-bdil}$	nitrogen	% DM
adilmax	3.5	curve parameterization	parameter of the maximal dilution curve $[N_{plante}] = \text{adilmax} \times MS^{-bdilmax}$	nitrogen	dimensionless
afpf	0.68 (Golden) 0.76	curve parameterization	parameter of the logistic function defining sink strength of fruits	yield formation	dimensionless

	(Crimson Crisp				
	0.038		maximal number		
afruitpot	0.013 for alternate bearing	global parameterization	of set fruits per degree day (indeterminate growth)	yield formation	degree.day ⁻¹
bdens	0.08	directly measured in the field	minimal density above which interplant competition starts	leaves	m ⁻²
bdil	0.51	curve parameterization	parameter of the critical dilution curve [Nplante]=adil MS ^{-bdil}	nitrogen	dimensionless
bdilmax	0.51	curve parameterization	parameter of the maximal dilution curve [Nplante]=adilmax x MS ^{-bdilmax}	nitrogen	dimensionless
bfpf	6.46 (Golden)	curve parameterization	parameter of the logistic curve defining sink strength of fruits (indeterminate growth): maximal growth rate relative to	yield formation	dimensionless

			maximal fruit mass		
	5.53 (Crimson Crisp)				
deshydbase	0.00155	directly measured in the field	phenological rate of evolution of fruit water	yield formation	% j ⁻¹
dfpf	0	directly measured in the field	parameter of the first growth phase of fruit, corresponding to an exponential function describing the cell division phase	yield formation	dimensionless
dlaimaxbrut	0.1	global parameterization	maximal rate of the setting up of LAI	leaves	m ² leaf/plant/degree.day
draclong	40	Literature (Ma et al. 2013)	maximal rate of root length production per plant	roots	cm/plant/degree.day
dureefruit	1600	directly measured in the field	total period of growth of a fruit from the setting stage to the physiological maturity	yield formation	degree.day

durvief	400	directly measured in the field	Maximal lifespan of an adult leaf	leaves	Q10
efcroirepro	5	global parameterization	maximal radiation use efficiency during the fruit filling phase	shoot biomass growth	g.MJ^{-1}
efcroiveg	1.1	global parameterization	maximal radiation use efficiency during the vegetative stage	shoot biomass growth	g.MJ^{-1}
hautbase	1.1	directly measured in the field	basal height of crop	leaves	m
hautmax	3	directly measured in the field	maximum height of crop	leaves	m
idebdorm	274	Literature (model BRIN simulation on Golden and Crimson Crisp cultivar (Garcia de Cortazar- Atauri et al. 2009))	day of the dormancy entrance	phenology	julian.day
ktrou	0.5	Literature (Lakso et al.	extinction coefficient of PAR through the	radiation transfers	dimensionless

		1995)	crop (used in the radiative transfer module)		
laicomp	0.5	directly measured in the field	LAI above which competition between plants starts	leaves	m ² .m ⁻²
longsperac	2000	Literature (Atkinson et al. 1998)	specific root length	roots	cm.g ⁻¹
masecNmax	1	curve parameterization	aerial biomass above which N dilution occurs	nitrogen	t.ha ⁻¹
nbinfo	1000 200 for alternate bearing	directly measured in the field	imposed number of inflorescences per plant	yield formation	nb.pl ⁻¹
pgrainmaxi	81 47 for alternate bearing	global parameterization	maximal fruit mass (at 0% water content)	yield formation	g
q10	3.43	Literature (model BRIN simulation on Golden cultivar (Garcia de Cortazar-Atauri et al. 2009))	Q10 used for the dormancy break calculation	phenology	dimensionless
remobres	0.1	global parameterization	fraction of daily remobilisable C	shoot biomass	dimensionless

		n	reserves	growth	
rsmin	250	Literature (Garcia de Cortazar Atauri 2006)	minimal stomatal resistance of leaves	water	s.m ⁻¹
slamax	400	directly measured in the field	maximal SLA (specific leaf area) of green leaves	partitioning of biomass in organs	cm ² .g ⁻¹
slamin	50	directly measured in the field	minimal SLA (specific leaf area) of green leaves	partitioning of biomass in organs	cm ² .g ⁻¹
spfrmin	0.56	global parameterization	minimal sources/sinks value allowing the trophic stress calculation for fruit onset	yield formation	dimensionless
	0.16 for alternative bearing				
splaimin	0.48	global parameterization	minimal value of ratio sources/sinks for the leaf growth	yield formation	dimensionless
	0.93 for alternative bearing				
stamflax	1000	directly measured in the field	cumulative thermal time between the stages AMF (maximum acceleration of leaf growth, end	phenology	degree.day

			of juvenile phase) and LAX (maximum leaf area index, end of leaf growth)		
stdordebou r	4900	directly measured in the field	cumulative thermal time between the dormancy break and the bud break	phenology	degree.day
stdrpdes	1000	directly measured in the field	cumulative thermal time between the DRP stage (beginning of fruit filling) and DEBDES (date of onset of water dynamics in fruits)	phenology	degree.day
stflodrp	100	directly measured in the field	cumulative thermal time between FLO (flowering) and DRP (beginning of fruit filling)	phenology	degree.day
stlevamf	30	directly measured in the field	cumulative thermal time between the stages LEV (leaf emergence) and	phenology	degree.day

			AMF (maximum acceleration of leaf growth, end of juvenile phase)		
			cumulative thermal time between the stages LEV (leaf emergence) and DRP (beginning of fruit filling)		
stlevdrp	180	directly measured in the field		phenology	degree.day
tcmax	37	Literature (Palmer et al. 2003)	maximal temperature for leaf expansion	leaves	°C
tcmin	10	Literature (Palmer et al. 2003)	minimal temperature for leaf expansion	leaves	°C
tdebgl	2.2	Literature (Palmer et al. 2003)	temperature below which frost affects plant growth	frost	°C
tdmax	37	Literature (Palmer et al. 2003)	maximal temperature above which development stops	phasic development	°C
tdmaxdeb	17.19	Literature (Palmer et al. 2003)	maximal temperature for hourly	phasic development	°C

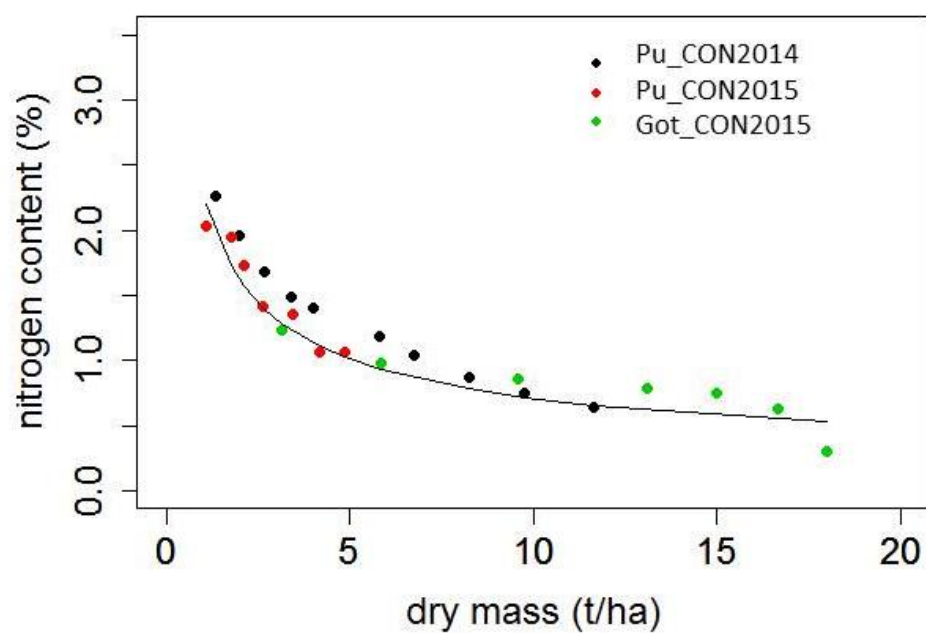
			calculation of phasic duration between dormancy and bud breaks		
tdmin	10	Literature (Palmer et al. 2003)	minimal temperature below which development stops	phasic developemen t	°C
tdmindeb	4.87	Literature (Palmer et al. 2003)	minimal thermal threshold for hourly calculation of phasic duration between dormancy and bud breaks	phasic developemen t	°C
temax	37	Literature (Palmer et al. 2003)	maximal temperature above which plant growth stops	shoot biomass growth	°C
temin	10	Literature (Palmer et al. 2003)	minimal temperature for development	shoot biomass growth	°C
teopt	25	Literature (Palmer et al. 2003)	optimal temperature for plant growth	shoot biomass growth	°C
tletale	-35	Literature	lethal	frost	°C

		(Palmer et al. 2003)	temperature for the plant		
Vmax2	0.07	global parameterization	maximal specific N uptake rate with the high affinity transport system	nitrogen	$\mu\text{mole/cm/h}$
lvfront	0.005	Literature (Ma et al. 2013)	root density at the root front	roots	$\text{Cm root.cm}^{-3} \text{ soil}$
stdrpnou	60	directly measured in the field	duration between beginning of fruit filling (IDRP) and end of fruit set (INOUE)	phenology	degree.day

Appendix 3.D: Maximal fruit, leaf and stem dry mass, N and C contents in fruits at harvest, mean annual N and C contents in leaves and stems of apple trees for the 9 studied cropping systems. Leaves are considered globally, without distinction between long and short shoot leaves. Standard deviations are indicated.

	Dry mass (kg/ha)			N (% of dry mass)			C (% of dry mass)		
	Fruit	Leaf	Stem	Fruit	Leaf	Stem	Fruit	Leaf	Stem
Pu_CON2014	11891 ± 5082	1220 ± 905	na ¹	0.50 ± 0.02	2.43 ± 0.36	na	41.58 ± 0.45	45.53 ± 0.58	na
Pu_LI2014	8037 ± 2519	1047 ± 764	na	0.40 ± 0.05	2.19 ± 0.27	na	41.42 ± 0.54	45.92 ± 0.64	na
Pu_LISR2014	8255 ± 1669	1664 ± 966	na	0.49 ± 0.06	2.21 ± 0.18	na	41.65 ± 0.27	45.40 ± 0.68	na
Pu_CON2015	5780 ± 230	2101 ± 290	314 ± 54	0.35 ± 0.03	2.03 ± 0.28	0.96 ± 0.10	39.712 ± 0.44	43.70 ± 0.78	49.83 ± 1.38
Pu_LI2015	1552 ± 307	1188 ± 127	243 ± 47	0.35 ± 0.04	1.82 ± 0.18	0.68 ± 0.07	40.10 ± 0.46	43.79 ± 0.87	52.28 ± 0.80
Pu_LISR2015	2167 ± 459	1677 ± 145	395 ± 119	0.44 ± 0.03	2.11 ± 0.11	0.67 ± 0.08	40.03 ± 0.15	44.21 ± 0.87	52.14 ± 0.98
Got_CON2015	15642 ± 4767	2124 ± 207	964 ± 441	0.41 ± 0.04	2.25 ± 0.19	0.86 ± 0.10	43.39 ± 1.52	45.72 ± 2.76	51.25 ± 0.10
Got_LI2015	12384 ± 3993	1972 ± 153	1038 ± 579	0.43 ± 0.04	2.16 ± 0.17	0.71 ± 0.04	43.17 ± 1.37	45.53 ± 3.16	50.07 ± 1.59
Got_ORG2015	6378 ± 2467	1161 ± 104	388 ± 362	0.40 ± 0.06	1.97 ± 0.17	0.64 ± 0.06	43.17 ± 1.18	44.99 ± 2.64	50.74 ± 0.66

¹Not available



Appendix 3.E: Critical dilution curve for the studied conventional (CON) cropping systems in the case of Golden cultivar. Dots represent the nitrogen content of aboveground biomass (leaves plus fruit plus stems). The line represents the adjusted curve. As 2015 was an off-crop year in Pugère, biomass did not exceed 5 t/ha (red points). Gotheron's CON systems presented the highest nitrogen content for the highest biomass (green points).

Appendix 3.F: Values of ecosystem functions indicators simulated by the STICS model for each of the 9 studied cropping systems.

system	Nmineralized kg N/ha/year	Nleached kg N/ha/year	Cseques_soil kg C/ha/year	Cseques_tree kg C/ha/year	Nabsorbed kg N/ha/year	NNi dimensionless	Watercomfort dimensionless	Crop load dimensionless	Cfruit kg C/ha/year
Pu_CON2014	166.61	56.19	-1578	6904	117.05	0.99	1	329	5966
Pu_LI2014	162.76	54.04	-1549	4294	91.51	0.99	1	332	3836
Pu_LISR2014	150.78	38.65	-1433	4029	85.95	0.99	1	259	3515
Pu_CON2015	170.24	35.46	-1611	2430	55.13	0.99	1	58	1307
Pu_LI2015	171.06	44.19	-1625	1480	44.67	0.98	1	79	934
Pu_LISR2015	166.64	36.74	-1586	1577	46.44	0.98	1	121	1067
Got_CON2015	109.93	36.15	-1030	7403	98.97	1.00	0.97	350	6485
Got_LI2015	120.34	38.13	-1130	5	101.45	1.00	0.98	328	6352
Got_ORG2015	90.06	7.59	-850	3637	45.44	0.91	0.99	192	3116

Appendix 3.G: Carbon amounts (in kg C/ha) in roots, trunks and main branches of apple trees in Gotheron site. Measures were operated on a sample of three excavated trees for each cropping system.

Got_CON2015	2028.26 ± 315	4491.74 ± 944	3924.94 ± 970
Got_LI2015	2477.89 ± 348	5534.66 ± 944	4322.92 ± 754
Got_ORG2015	1644.52 ± 498	3862.82 ± 677	2992.57 ± 971

ANNEXES CHAPITRE 4

Annexe 4.A : Tableau de recueil d'information pour le carpocapse																												
Gestion du verger et conditions du milieu			Impact du facteur sur la sévérité des dégâts	Références bibliographiques (sources)	Biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	expert 7	expert 8	Note finale	Convergence d'avis (%)	Nombre d'avis	Poids des avis	Biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	Intensité finale					
					Effets positif (+), négatif (-) ou neutre (0) sur les dégâts													Intensité des effets des facteurs sur les dégâts (0 à 3)										
Pratiques culturales	Conduite	Taille	d'hiver	La taille annuelle des arbres favorise la circulation de l'air et la pénétration du soleil ce qui stimule la productivité de l'arbre et contribue à diminuer l'attaque de bioagresseurs	(Simon et al. 2012)	0																						
				(Costes et al. 2013)																								
				(Simon et al. 2010)																								
			Hauteur	Hauteur élevée attire le carpocapse pour accouplement			-		+	+						+	75	4	300		3						2	2.5
	fertilisation	Organique	Affecte sensibilité des plantes aux nuisibles	(Altieri and Nicholls 2003)	-	?		?	0						0	50	3	150										
(Burel et al. 1994)																												

[illegible]

[illegible]

		Virus	Insecticides biologiques à base de virus de la granulose (carpovirusine) / peut limiter fortement les populations de carpocapse en place	(Provost et al. 2008)	-	?		-	-					-	-	100	5	500		2 + risque résistance		3 ou 2	2 à 3	2.375
				(Pimentel 2005)																				
				(Simon et al. 2010)																				
		Lâchers inondatifs	Trichogrammes	Lâchers inondatifs de Thrichogrammes pour stabiliser population	(Aubry 2008)	-	?		?	0				0	0	75	4	300						
					(Athanassov et al. 1998)																			
	(Hassan 1989)																							
	(Yu et al. 1984)																							
		Mâles stériles	Lâchers inondatifs de mâles stériles	(Aubry 2008)	-	?		?	0				0	0	75	4	300							
	Prophylaxie	Bande piège	Bande de carton alvéolée évite le stade larvaire (les larves se mettent à l'intérieur et à la mi-octobre on brûle le carton)	(Samietz and Höhn 2010)	-	-	-	-	-					-	-	100	7	700		1	3	1	1.5	
				(Fredon Corse 2008)																				
			Palox ®	Carpocapse susceptible de pondre à l'intérieur			+	+	+	+					+	+	100	6	600				1 à 2	1.25

			Gestion de la litière foliaire	Brûler les feuilles, les tiges ou l'œil des fleurs fécondées pour tuer les œufs de carpocapse	(Charmillot and Höhn 2007)	-	0		0	0					-	0	67	6	402									
					(Samietz and Höhn 2010)																							
			Elimination fruits au sol et fonds de cueille	Ramassage des fruits pour diminution de l'inoculum (larve dans fruit)	(Samietz and Höhn 2010)	-	-	-	-	-							-	-	100	7	700	1 Efficacité relative (fait à une période donnée)			1 à 2		1.25	
					(Fredon Corse 2008)																							
			Lutte physique	Filets AltCarpo	Filet mono parcelle	Filets Alt Carpo (barrière physique) : Protection grêle et diminue légèrement effets négatifs liés au vent	(Koké et al. 2011)	-	-	-	-	-						-	-	100	7	700				2	2	2
						Augmentation vigueur arbre	(Laget et al. 2015)																					
	Filet monorang	Réduction insecticides, développement auxiliaires				-	-	-	-	-						-	-	100	7	700	3	3	3	3	3	3		

[illegible]

					mare		(Ricard et al. 2012)		-	?		-		-		?	-	100	4	400								
					souche d'arbre		(Ricard et al. 2012)		-	?		+				0	0	50	4	200								
					nichoir et gite artificiel		(Le Roux et al. 2008) (Griffon 2006) (Ricard et al. 2012)	-	-	-	-	-		0		0	-	75	8	600								
					arbre isolé		(Ricard et al. 2012)	-		?	+	+				+	+	80	5	400								
					effets insecticides sur auxiliaires		(Grigg-McGuffin et al. 2015) (Samietz et al. 2007)	+		?	+	+				+	+	100	5	500								
					effet herbicides sur auxiliaires		(Griffon 2006) (Wyss 1995)	+		?		+	+			+	+	100	5	500								
					fragmentation		(Tscharntke et al. 2008) (Bianchi et al. 2006)	-		?	-	-				0	-	75	5	375								
	auxiliaires	Prédation	Arthropodes	Araignées												-	-	100	2	200								
				Carabe													-	-	100	2	200							

				Parasitisme		Vertébrés	Chauve-souris		(Boreau de Roincé 2012)	-		?	0	?						0	50	3	150																
						Insectes	Hyménoptères		(Ricard et al. 2012)											-	-	100	2	200															
Conditions de milieu		Température				Problème de développement + reproduction		(Lacey et al. 2006)																															
		Haute																																					
		Humidité								Forte		Pluie peut décoller les œufs sur les feuilles mais ses ailes sont tout de même hydrophobes / obligation de feuillage sec pour la ponte.		Chambre régionales d’agriculture Normandie, Chambre d’Agriculture de Seine-Maritime																									
		Vent								Fort		Carpocapse gêné par le vent		(Lacey et al. 2006)																									
		Eclairage												Carpocapse attiré par la lumière		(Collins and Machado 1943)																							

Annexe 4.B : Recueil d’information sur le puceron cendré																								
Gestion du verger et conditions du milieu				Impact du facteur sur la sévérité des dégâts	Références bibliographi-ques (sources)	Biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	Note finale	Convergence d'avis (%)	Nombre d'avis	Poids des avis	Biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	Intensité finale
						Effets positif (+), négatif (-) ou neutre (0) sur les dégâts										Intensité des effets des facteurs sur les dégâts (0 à 3)								
Pratiques culturales	Conduite	Taille	Effeuillage	Défoliation automnale. N'engendre pas de modifications physiologiques	(Romet 2004)	-		-		+	-		-	75	5	3785								
			D'hiver	La taille annuelle des arbres favorise la circulation de l’air et la pénétration du soleil ce qui stimule la productivité de l’arbre	(Simon et al. 2012)	-	?		+	+ et -	+	+	50	4	200									
					(Costes et al. 2013)																			
					(Simon et al. 2010)																			
Taille des gourmands	Les gourmands sont les premiers organes attaqués par les pucerons		-		-		-	-	-	-	100	6	600						3		3			

[illegible]

		Densité plantation		Forte	Augmentation du nombre de pommiers à l'hectare aide le puceron à se propager sur les arbres jeunes	(Yang et al. 2011)	+		?	+	0	+	75	4	300			1 effet très partiel					1
				Faible	Baisse du nombre de pommiers à l'hectare freine activité puceron		-			-	0	-	75	4	300			1					1
	Protection phytosanitaire	Insecticides		Oui						-	-	-	100	3	300								0
				Non	Insecticides végétaux peu efficaces sur des colonies installées et peu sélectifs (tuent auxiliaires aussi) // résistances aux insecticides	(Boivin et al. 2003)	+		-	+	+	+	80	5	400		1 à 2						1.5
		Positionnement	Feuilles enroulées							+	+	+	100	3	300								0
										-	-	-	100	3	300							3	3

Lutte physique	Huiles blanches et pyrèthre	Traitement aux huiles blanches (paraffine) diluées à 1 ou 1,5% dès l'ouverture des bourgeons si la T°C > 10°C car on veut toucher les œufs en cours d'éclosion et les jeunes fondatrices	(Romet 2003)	-		-	-	-	-	-	100	5	500			2	2			2	2
		Traitement 2nde fois avant floraison quand les feuilles s'écartent avec insecticide végétal (pyrèthre) pour atteindre les fondatrices plus âgées																			
	Soufre						-		0		0	50	2	100							
Lutte physique	Barrages englués	Poser des barrages englués à fourmis (glu à insectes)	(Romet 2003)	-		?	(ou+)	-	-	-	75	4	300			1	1				1
Produits divers	Kaolinite	Lutter avec de la kaolinite pulvérisée sur les feuilles et fruits (argile calciné)	(Wyss 1995)	-		-		-	-	-	100	5	500	2	1	2	2				1.75
			(Romet 2003)																		
			(Puterka et al. 2000)																		

Lutte biologique par conservation			Savon potassique		ASPRO (Association pour la promotion des produits naturels peu préoccupants)	-		-		?	-		-	100	4	400							0		
			Purin d'ortie			-		-		?	-		-	75	4	300		1					1		
	IAE		Haies brise-vent (ou lisière boisée)	Amène biodiversité et donc auxiliaires et régule bioagres-seurs mais baisse vent	(Sauphanor et al. 2009)	- et +	-	?	+	0	-		0	33.3	6	199.8							2.4		
					(Ricard et al. 2012)																				
		Mare		(Ricard et al. 2012)		-	?		?			-	100	2	200							0.6			
		Souche				-	?		+			0	33	3	99							0.1			
		Nichoir et gîte artificiel				-	?				-	100	2	200					1		1	0.7			
		Arbre isolé				-	?				-	100	2	200								0.05			
		Auxiliaires		Fragmentation	Plus grande fragmentation donne plus grande biodiversité et donc auxiliaires	(Bianchi et al. 2006)	-							-	100	2	200							0	
						(Tscharntke et al. 2008)																			
			Effets des herbicides sur les auxiliaires					+		-	+		+	75	4	300		3		1			2		
			Enherbement	Non									+	100	1	100								0	
				Oui	Favoriser un maximum la présence des insectes auxiliaires (haies	(Le Roux et al. 2008)	-						-	-	100	3	300				1			1	1
						(Wyss 1995)																			
				(Dib et al. 2010)																					

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Annexe 4.C : Recueil d’information sur la tavelure																										
Gestion du verger et conditions du milieu				Impact du facteur sur la sévérité des dégâts	Références bibliographi-ques (sources)	biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	expert 7	Note finale	Convergen- e d'avis (%)	Nombre d'avis	Poids des avis	biblio	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	expert 7	Intensité finale
						Effets positif (+), négatif (-) ou neutre (0) sur les dégâts												Intensité des effets des facteurs sur les dégâts (0 à 3)								
Pratiques culturales	Conduite	Taille	D'hiver	La pénétration de l’air et du vent accélère le séchage du feuillage après une pluie et réduit ainsi la période d'humectation et le développement des infections secondaires. La taille permet aussi une bonne pénétration des fongicides jusqu’au centre des arbres.	(Morel et al. 2013)	-		-		-	-			-	80	5	400	2						2		
				(Simon et al. 2012)																						
				(Costes et al. 2013)																						
				(Simon et al. 2010)																						
	Fertilisation	Organique	Affecte sensibilité des plantes aux nuisibles via stress azoté possible	(Altieri and Nicholls 2003)	0		0		+	0			0	80	5	400										

[illegible]

[illegible]

Protection phytosanitaire		Faible		Baisse du nombre de pommiers à l'hectare peut atténuer contamination tavelure	(Yang et al. 2011)	-						-	100	3	300						1			1	
	Fongicides	Résistance	Oui		(Aubertot et al. 2005)	-				-	-		-	100	4	400	3				3			3	
					(Ilhan et al. 2006)																				
			Non		(Sauphanor et al. 2009)	+						+	100	3	300	1								1	
					(Caffier et al. 2014)																				
					(Poisson 2013)																				
					(Parisi et al. 1993)																				
		Positionnement	Préven- tif	Avant contamination (utilisation OAD Rimpro)						-	-			-	100	3	300					3	3		3
			Stop	dès apparition de la tavelure						-	0			0	66	3	198					3			3
	Curatif		Après contamination de la spore (jusqu'à 5 jours après le début de la pluie)							-	0			0	50	3	150					3			3
	Bouillie sulfocalcique	Soufre agit sur spores en phase de germination // Efficacité inférieure au	(Jamar et al. 2010) (Jamar and Lateur 2009) (Sauphanor	-			-		-	-		-	100	5	500					1	2			1.5	

[illegible]

		Bouillie potassique (efficacité égale au soufre)						-		-		-	0			-	66	5	330					1				1
		Bicarbonate de sodium						-		-		0			-	75	4	300									0	
		Biotechnique	Stimulation de défenses naturelles			Lodus, très faible efficacité, Bion : molécule plus petite donc pénètre mieux					-		-	?		-	-	100	4	400				1		1		
Lutte biologique	Bactéries				Bactéries (surtout Pseudomonas fluorescens BK3)		(Hossain et al. 2009)	0		?		0	0			0	100	4	400									
					Bactéries épiphytiques luttent biologiquement contre divers pathogènes et peuvent être détruites par irradiation UV ou traitement chimique	(Kucheryava et al. 1999)																						
		Nématodes				Des nématodes vont se nourrir du champignon	(Lacey et al. 2006)																					

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Annexe 4.D : Pression du carpocapse en 2014 et 2015 sur les dispositifs expérimentaux de Gotheron et de La Pugère						
Gotheron						
Génération	Got_CON2014	Got_LI2014	Got_ORG2014	Got_CON2015	Got_LI2015	Got_ORG2015
G1	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
G2	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Forte
G3	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne
Pugère						
	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2014	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2015
G1	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne
G2	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne
G3	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible

Annexe 4.E : Pression du puceron cendré en 2014 et 2015 sur les dispositifs expérimentaux de Gotheron et de La Pugère						
Gotheron						
	Got_CON2014	Got_LI2014	Got_ORG2014	Got_CON2015	Got_LI2015	Got_ORG2015
	Moyen	Fort	Moyen	Fort	Moyen	Fort
Pugère						
	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2014	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2015
	Faible	Moyen	Faible	Faible	Moyen	Faible

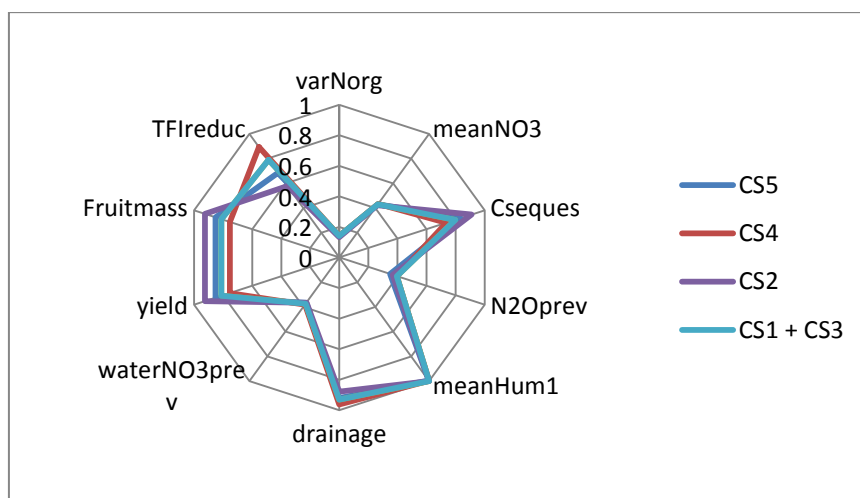
Annexe 4.F : Pression de la tavelure en 2014 et 2015 sur les dispositifs expérimentaux de Gotheron et de La Pugère						
Gotheron						
	Got_CON2014	Got_LI2014	Got_ORG2014	Got_CON2015	Got_LI2015	Got_ORG2015
Risque printemps : nombre de contaminations	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte
Risque printemps : répétabilité	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible
Inoculum n-1	Faible	Forte	Moyen	Faible	Fort	Faible
Pugère						

	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2014	Pu_CON2014	Pu_LI2014	Pu_LISR2015
Risque printemps : nombre de contaminations	Forte	Moyenne	Faible	Faible	Forte	Faible
Risque printemps : répétabilité	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible
Inoculum n-1	Faible	Moyen	Faible	Faible	Moyen	Faible

ANNEXES CHAPITRE 5

Appendix 5.A: Distribution (%) of the modalities of the agricultural practices in the 150 virtual orchard cropping systems.

N fertilization	min140	min70	min_org140	min_org70	org140	org70	no_fert
	23	22	23	18	16	22	26
Irrigation	com	HWS	LWS	no_irri			
	37	37	37	39			
Codling moth control	CMnet	CMbc	CMch	CM0			
	56	22	37	35			
Rosy apple aphid control	APbc	APch1	APch2	AP0			
	40	40	36	34			
Apple scab control	SCch	SCbc	SCcov	SCvar	SC0		
	32	35	29	28	26		



Appendix 5.B: Ecosystem services profiles of the 5 identified non-dominant cropping systems on radar plots. CS stands for cropping system. CS1 and CS3 represent the same agricultural practices combination. They present the shortest distance to the ideal trade-off solution.

- **Bénéfices** : On parle de bénéfices lorsque le bien être humain est directement affecté ou lorsqu'on s'en rapproche en créant un gain de bien-être.
- **Bioagresseur** : Organisme pouvant engendrer des dégâts et/ou des dommages sur les cultures. Il s'agit d'agents responsables de maladies, de ravageurs ou de plantes adventices.
- **Biodiversité fonctionnelle** : regroupe les espèces ayant des fonctions écologiques particulières (pollinisateurs, prédateurs, parasites et parasitoïdes, phytophages...)
- **Contrôle génétique** : Les variétés ou porte-greffes du pommier peuvent présenter des sensibilités plus ou moins élevées aux maladies ou aux ravageurs voire des résistances « totales » à certaines souches de maladies (ex. variétés résistantes à la tavelure chez le pommier). De plus, le matériel végétal peut être un levier pour limiter l'utilisation d'éclaircissants chimiques pour réduire la charge en fruits du pommier, les variétés n'ayant pas la même aptitude à réguler naturellement le nombre de fruits par arbre (Laget et al. 2015).
- **Fonctions écosystémiques** : beaucoup d'auteurs ne font pas forcément la différence entre fonction et service. Il est important de séparer les moyens (fonctions) des fins (les services). La minéralisation par exemple n'est pas une fin en soi, mais une fonction écosystémique dont le potentiel influence plus généralement la notion de fertilité du sol. Dans mon cadre d'étude, processus et fonctions se référeront aux interactions complexes (événement, réaction et opérations) entre éléments biotiques et abiotiques d'écosystèmes, entraînant un résultat final. Ces processus impliquent le transfert d'énergie et de matière (Wallace, 2007). Pour reprendre l'exemple vu précédemment, la minéralisation transforme de l'azote organique en azote minérale, susceptible d'être utilisé par la plante pour satisfaire ces besoins azotés.
- **Infrastructure Agro-Ecologique (IAE)** : toute infrastructure sur un système de culture ou sur un périmètre de 150 m autour de ce système ayant une valeur écologique pour la production agricole (ex : des haies, des bandes enherbées ou florales, des bosquets, etc...). Son utilisation augmente la biodiversité fonctionnelle* du système de culture (Boller et al. 2004).

- **Lutte biologique** : La lutte biologique repose sur l'utilisation d'organismes vivants (ou, au sens large, de leurs produits) pour limiter les populations de bioagresseurs. Ces organismes sont appelés auxiliaires des cultures (le terme auxiliaire inclut également d'autres groupes tels que les pollinisateurs) ou « ennemis naturels » des bio-agresseurs des cultures. Il s'agit principalement d'organismes prédateurs (auxiliaires qui tuent et mangent leurs proies au cours de leur vie) ou parasitoïdes (auxiliaires qui se développent aux dépens d'un hôte unique et conduisent à sa mort). La lutte biologique repose sur le lâcher de macro-organismes et/ou la pulvérisation de micro-organismes (ou de macro-organismes de très petite dimension comme certains nématodes invisibles à l'œil nu) (Laget et al. 2015).
- **Lutte biologique par conservation** : gestion du paysage et des habitats des ennemis naturels indigènes autour des cultures afin de les attirer et de les maintenir dans les agroécosystèmes dans un objectif de protection des cultures (Ricard et al. 2012).
- **Lutte biotechnique** : elle s'appuie sur les interactions chimiques qui peuvent exister entre individus ou espèces. Elle fait notamment référence à la confusion sexuelle utilisée contre les Lépidoptères, qui consiste à perturber la communication entre sexes au sein d'une même espèce afin de limiter les accouplements et, de fait, les pontes et les dégâts dûs aux larves de l'espèce (Laget et al. 2015).
- **Lutte physique** : Les barrières physiques empêchent le contact entre le bioagresseur et la plante et/ou perturbent le comportement du bioagresseur en intervenant sur certains processus (reconnaissance de la plante-hôte, prise alimentaire, reproduction, ponte, déplacement au sein de ou entre plante-hôtes, développement...).
- **Produit phytopharmaceutique** : Produit ayant pour action de protéger les végétaux ou les produits des végétaux contre des organismes qui leur sont nuisibles, d'exercer une action sur les processus vitaux des végétaux, dans la mesure où il ne s'agit pas de substances nutritives (ex. stimulateurs de croissance, éclaircissants), d'assurer la conservation des produits végétaux, de détruire les végétaux indésirables (ex. herbicides), de freiner ou de prévenir une croissance indésirable des végétaux (ex. régulateurs de croissance).

Par extension, ce terme comprend aussi quelques produits qui agissent sur certains mécanismes physiologiques des plantes. Ce sont des préparations contenant une ou plusieurs substances actives responsables des propriétés du produit et des substances appelées « co-formulants » pour obtenir une formulation appropriée à l'application. Les produits phytopharmaceutiques ne peuvent être utilisés que s'ils ont obtenu une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) régie par le Règlement (CE) n° 1107/2009 (Laget et al. 2015).

Système de culture (SdC) : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles gérées de manière similaire. Chaque SdC se caractérise par la nature de la culture (espèce, caractéristiques variétales), son mode de conduite (forme fruitière, distance de plantation, gestion de l'arbre...) et les itinéraires techniques appliqués à cette culture en fonction de ses objectifs (agronomiques, commerciaux...) (Laget et al. 2015)

Le concept de « service écosystémique », en plein essor depuis la publication du Millenium Ecosystem Assessment en 2005, a permis de souligner l'importance des performances non-marchandes des écosystèmes. En arboriculture, assurer une bonne productivité tout en préservant les ressources naturelles et la santé humaine est aujourd'hui un défi majeur, qui peut être analysé sous l'angle des services écosystémiques. Quels sont ces services au sein d'un verger de pommiers ? Comment les analyser ? Quels sont les liens - conflits et synergies - entre services écosystémiques multiples et comment les systèmes de culture modifient-ils les profils de services multiples ? Ce travail de thèse vise à répondre à ces questions avec une démarche novatrice combinant mesures expérimentales, modélisation et analyse statistique.

Suite à une analyse bibliographique des services écosystémiques pouvant être délivrés dans des vergers, cinq services ont été sélectionnés. Il s'agit de la production de fruits, de la disponibilité de l'azote dans le sol, de la régulation du climat reposant sur la prévention de la dénitrification de l'azote et sur la séquestration du carbone, de la maintenance et de la régulation du cycle de l'eau y compris de sa qualité, et de la régulation des bioagresseurs. Conjointement à ces services nous avons considéré les nuisances environnementales dues aux pesticides. Pour chaque service nous avons identifié les fonctions écosystémiques sous-jacentes ainsi que les pratiques agricoles et les conditions pédoclimatiques ayant un impact sur ces fonctions. Les services et fonctions ont été décrits par un ou plusieurs indicateurs et quantifiés à l'aide de modèles dans les cas suivants : (i) neuf systèmes de culture réels sur deux dispositifs expérimentaux dans le sud-est de la France et (ii) 150 systèmes de culture fictifs conçus à partir de la combinaison de cinq leviers de pratiques et de leurs modalités, dans des conditions pédoclimatiques identiques. Les deux modèles utilisés ont été STICS, un modèle générique de simulation du fonctionnement du sol et des cultures sous l'influence des pratiques, qui a nécessité une paramétrisation et une évaluation sur pommier à partir de mesures expérimentales, et IPSIM, une plateforme de modélisation simulant les effets des pratiques et des conditions du milieu sur les dégâts aux cultures causés par les bioagresseurs. IPSIM a été paramétré sur pommier, sur la base d'une importante étude bibliographique et à dire d'experts. Les simulations des modèles ont fait l'objet d'analyses statistiques simples dans le cas des systèmes de culture réels, et d'analyses multivariées à deux tableaux (analyse en composantes principales avec variables instrumentales) pour les systèmes de culture fictifs.

Pour les neufs systèmes de culture réels, 14 liens importants entre services écosystémiques ont été identifiés, notamment des conflits comme celui entre la prévention de la dénitrification ou de la lixiviation de l'azote et la disponibilité de l'azote dans le sol à court terme, et des synergies, comme celle entre l'humidité du sol ou la séquestration du carbone et la disponibilité de l'azote dans le sol à court terme. Ces liens entre services sont expliqués par les fonctions écosystémiques sous-jacentes. La comparaison de profils de services entre systèmes a mis en évidence l'impact de pratiques agricoles sur certains services. Ainsi, sur un même site, une forte densité de plantation augmente la production de fruits et la séquestration du carbone. La fertilisation exclusivement sous une forme organique diminue la production de fruits via un stress azoté mais diminue également la lixiviation. Par ailleurs, les profils de services sont fortement influencés par les caractéristiques pédoclimatiques de chaque site. Ces résultats confortent la nécessité d'une prise en compte explicite de l'interdépendance 'pratiques x conditions du milieu' pour analyser les services. Les résultats des systèmes de culture fictifs, en plus de renforcer ceux des systèmes réels, ont permis de préciser l'impact sur les fonctions et services écosystémiques de la fertilisation, de l'irrigation et des pratiques de protection contre le carpocapse, la tavelure et le puceron cendré. L'analyse met en évidence et quantifie la complexité des interactions intervenant sur les profils de services multiples. Par exemple, une réduction de l'irrigation occasionnant un fort stress hydrique limite la production de fruits directement, mais aussi indirectement, par une diminution de la minéralisation et un impact sur la disponibilité de l'azote dans le sol avec des conséquences sur d'autres fonctions. Les systèmes de culture aboutissant aux compromis les plus favorables entre services ont été identifiés au sein des systèmes virtuels de vergers de pommiers : il s'agit notamment de systèmes à fertilisation minérale ou organo-minérale ne dépassant pas un apport en azote de 70 kg/ha, avec une bonne irrigation et une protection par des leviers non-chimiques comme le filet 'Altcarpo' ou des variétés résistantes à la tavelure.

Cette démarche centrée sur la cascade 'pratiques culturales – fonctions écosystémiques – services écosystémiques', combinant observation, simulation à partir de modèles, et analyse statistique, devrait contribuer à l'optimisation des systèmes de culture en vergers sous l'angle des services écosystémiques. Pour la mettre en œuvre, il sera cependant nécessaire de créer une nouvelle génération de modèles capables de rendre compte d'une part de services multiples d'une façon pleinement intégrée, et d'autre part de l'effet d'une gamme élargie de leviers de gestion, qui concernent notamment, et de façon explicite, la biodiversité planifiée et la biodiversité associée.

Mots-clés : vergers de pommiers, services écosystémiques, systèmes de culture, sol, climat, pratiques agricoles, cycles biogéochimiques, contrôle des bioagresseurs, modélisation, STICS, IPSIM

SUMMARY

The concept of « ecosystem service », which has been used increasingly since the publication of the Millennium Ecosystem Assessment in 2005, has highlighted the importance of ecosystem's non-marketed performances. In orchards, ensuring high productivity while preserving natural resources and human health has become a real challenge that could be analyzed with the concept of ecosystem service. Which ecosystem services are delivered in an apple orchard? How to analyze them? What are the relationships - conflicts or synergies – among multiple ecosystem services and how do cropping systems change multiple ecosystem service profiles? This PhD work aims at answering those questions with an innovative approach combining experimental measures, modeling and statistical analysis.

Based on a literature review of ecosystem services in orchards, five services were selected: fruit production, nitrogen availability in soil, climate regulation based on the prevention of nitrogen denitrification and on carbon sequestration, maintenance and regulation of water cycle, including water quality, and pest control. We also considered the environmental disturbances caused by the use of pesticides. For each service, we identified the underlying ecosystem functions as well as the agricultural practices and soil and climate conditions affecting these functions. Services and functions were described by one or multiple indicators and quantified using models in the case of (i) nine existing cropping systems on two experimental sites in southeastern France differing in terms of soil and climate conditions, and (ii) 150 virtual cropping systems designed out of the combination of five major agricultural practice levers and their modalities, in identical soil and climate conditions. The two models used were STICS, a generic soil-crop simulation model under the influence of practices which required a parameterization and an evaluation on apple orchards based on experimental measures, and IPSIM, a generic modeling framework simulating the impacts of agricultural practices and local conditions on crop injuries caused by pests. IPSIM was parameterized on apple orchards, based on an important literature review and expert opinions. Model simulations were analyzed with simple statistics in the case of the nine existing cropping systems and with two-table multivariate analyses (principal component analysis with instrumental variables) for virtual cropping systems.

Concerning the existing cropping systems, 14 important relationships were identified among ecosystem services, especially conflicts, like the one between nitrogen denitrification or leaching prevention and soil nitrogen availability on the short term, and synergies such as the one between soil humidity or carbon sequestration and nitrogen availability on the short term. These relationships

are explained by the underlying ecosystem functions. Comparing service profiles among cropping systems highlighted the impacts of agricultural practices on some services. That way, on a same site, a high planting density increases fruit production and carbon sequestration. An exclusively organic fertilization decreases fruit production through nitrogen stress but also nitrogen leaching in drained water. Furthermore, service profiles are strongly influenced by the soil and climate conditions of each site. These results strengthen the need to explicitly consider the 'agricultural practices x soil and climate conditions' interdependence in order to analyze ecosystem services. The results obtained with the virtual cropping systems simulations confirmed those of the existing ones and gave precision on the impacts of fertilization, irrigation and pest control for codling moth, rosy apple aphid and apple scab on ecosystem functions and services. The analysis highlights and quantifies the complex interactions impacting multiple service profiles. For example, a decrease in irrigation inputs, which causes a high water stress to the plant, limits fruit production in a direct way. However, it may also decrease nitrogen mineralization, which impacts nitrogen availability in soil. This can have negative consequences on ecosystem functions implied in fruit production. The virtual cropping systems resulting in the most favorable trade-offs among services were identified: they used mineral or organo-mineral fertilization with nitrogen quantities not exceeding 70 kg/ha, good irrigation and non-chemical orchard protection methods such as exclusion 'Altcarpo' nets or scab resistant cultivars.

This approach, which focuses on the 'agricultural practices – ecosystem functions – ecosystem services' cascade and combines observation, model simulation and statistical analysis, should contribute to the optimization of apple orchards cropping systems from an ecosystem service perspective. In order to implement it, a new generation of models must be created that account, firstly, for multiple ecosystem services in a genuinely integrated manner, and secondly, for the effects of an enlarged range of agricultural practices levers, that mainly concern planned biodiversity and associated biodiversity.

Keywords: apple orchards, ecosystem services, cropping systems, soil, climate, agricultural practices, biogeochemical cycles, pest control, modelling, STICS, IPSIM