

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Utilité des problèmes de satisfaction de contraintes pour l'aide à la conception de vergers maraîchers

Emmanuelle GODIN

Option APVE

Promotion 2010-2013

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Utilité des problèmes de satisfaction de contraintes pour l'aide à la conception de vergers maraîchers

Emmanuelle GODIN
Option APVE, Promotion 2010-2013

Maître de stage : Marc TCHAMITCHIAN
Tuteur pédagogique : Mathieu CAPITAINE

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier Marc Tchamitchian, directeur de l'unité Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon, de m'avoir accordé sa confiance pour ce stage, et prodigué ses précieux conseils tout au long de ma mission.

J'adresse ensuite mes remerciements à tous les experts de l'INRA et du GRAB qui se sont toujours montrés disponibles pour répondre à mes questionnements : André Sieffert, pour sa connaissance des vergers maraîchers, Julien Ronzon pour son expertise en maraîchage, Arnaud Dufils pour ses apports en arboriculture, enfin Thomas Schiex et Simon Degivry pour leur support et leurs recommandations en modélisation.

Je remercie aussi l'équipe pédagogique de VetAgroSup, dont tous les enseignants qui m'ont transmis leurs savoirs pendant 3 ans, en particulier Nathalie Vassal, responsable de l'option « Agriculture, Productions Végétales et Environnement », pour tout le dynamisme et la bonne humeur qu'elle sait insuffler à cette option ; également Mathieu Capitaine, mon tuteur de stage, pour ses suggestions à toutes les étapes du stage, jusqu'à la remise de ce mémoire.

Enfin, mes derniers remerciements vont à tous les membres de l'unité Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon que j'ai côtoyés ces printemps et été 2013, stagiaires, thésards, ingénieurs et chercheurs, pour leur accueil et leurs échanges sur les multiples thématiques qui font la richesse de cette unité, de l'agronomie à l'économie en passant par la zootechnie, les systèmes d'information, la modélisation, la géomatique, la sociologie ou l'urbanisme.

Résumé

La nécessaire écologisation des pratiques agricoles dans les pays développés se traduit depuis quelques années par la recherche de systèmes innovants à la fois rentables économiquement et respectueux de l'environnement, avec des objectifs de durabilité à moyen et long termes. Les systèmes agroforestiers, associant arbres et cultures sur une même parcelle, sont de ces systèmes écologiquement intensifs qui permettent une meilleure exploitation des ressources naturelles disponibles, et donc un niveau de production accru sur une même surface. Le verger maraîcher, un système agroforestier horticole associant arbres fruitiers et cultures maraîchères, a été délaissé au milieu du siècle dernier pour des raisons économiques, mais fait aujourd'hui l'objet de recherches pour sa possible réintroduction à des fins écologiques, avec des fondements agronomiques pour assurer sa rentabilité.

Les fondements agronomiques des vergers maraîchers sont une conjonction de résultats scientifiques et de retours d'expérience d'agriculteurs, concernant les interactions entre arbres fruitiers et cultures maraîchères. Ces fondements constituent le socle commun de connaissances qui peut être mobilisé lors de démarches de co-conception de vergers maraîchers, en particulier pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision, dont les modèles. Une preuve de concept de modélisation sous forme de problème de satisfaction de contraintes (CSP) est construite, proposant des agencements de vergers maraîchers tirant au mieux parti d'une sélection d'interactions entre arbres et cultures. Cette preuve de concept pose les bases d'un modèle plus complet, de formalisme CSP ou autre, qui pourrait être mis en œuvre dans l'accompagnement de la conception de systèmes associant arbres et cultures.

Mots-clés : agrisylviculture, verger maraîcher, aide à la conception, modélisation, problème de satisfaction de contraintes, représentation spatio-temporelle

Abstract

The necessary ecologization of agriculture in the developed countries has recently resulted in the research of innovative systems that are both economically viable and environmentally friendly, with sustainable objectives at mid and long terms. The sylvoarable systems, mixing trees and crops on the same plot, are ecologically intensive systems that allow a better use of natural resources, hence increase production on the same land area. The vegetable orchard is a sylvoarable system mixing fruit trees and vegetable crops that disappeared in the 1950's for economic reasons. Its possible reintroduction becomes a new research topic for ecological purposes, with agronomic bases to ensure its viability.

The vegetable orchards' agronomic bases are a combination of scientific results and feedback from farmers on the interactions between fruit trees and vegetable crops. These bases are the common knowledge to be harnessed during vegetable orchards' co-design processes, especially for developing decision-support tools, such as models. A proof of concept is built for modelling the vegetable orchard with constraint satisfaction problems (CSP), proposing layouts of fruit trees and vegetable crops that take maximum advantage of a set of interactions between them. This proof of concept is the core of a more exhaustive model to be built, with CSP formalism or another, which could be used to support the design of systems mixing trees and crops.

Keywords: sylvoarable systems, vegetable orchard, design support, modeling, constraint satisfaction problem, spatio-temporal representation

Table des matières

I - Introduction	1
II - Partie 1 : Contexte du stage.....	2
II.1 - Conception de vergers maraîchers	2
II.1.1 - Que sont les vergers maraîchers ?	2
II.1.2 - Pourquoi les vergers maraîchers aujourd'hui ?	2
II.1.3 - Comment concevoir les vergers maraîchers ?	3
II.1.3.1 Accompagner la conception à l'aide de modèles	3
II.1.3.2 Modéliser l'espace et le temps.....	3
II.1.4 - Construction et évaluation d'un modèle CSP de preuve de concept.....	4
II.2 - Synthèse bibliographique	4
II.2.1 - Propriétés des systèmes agroforestiers	4
II.2.1.1 Principes de base de l'agrisylviculture	4
II.2.1.2 Interactions souterraines : eau et éléments nutritifs.....	6
II.2.1.3 Interactions aériennes : lumière, ombre et occupation de la surface cultivable	7
II.2.1.4 Diversification des cultures : les atouts d'une plus grande biodiversité.....	8
II.2.1.5 Efficience des systèmes agroforestiers : indicateurs économiques et organisation du travail	9
II.2.2 - Caractéristiques des productions horticoles.....	10
II.2.2.1 Caractéristiques des arbres fruitiers.....	10
II.2.2.2 Caractéristiques des cultures maraîchères	13
III - Partie 2 : Preuve de concept de la modélisation sous forme de problème CSP pour l'aide à la conception de vergers maraîchers	15
III.1 - Objectifs de la preuve de concept	15
III.2 - Matériels et méthodes	15
III.2.1 - Constitution d'une base de connaissances pour la modélisation.....	15
III.2.1.1 Types d'interactions.....	15
III.2.1.2 Règles de fonctionnement du système.....	16
III.2.1.3 Caractéristiques des espèces cultivées entrant en jeu	16
III.2.2 - Modélisation au formalisme CSP.....	16
III.2.2.1 Définition d'un modèle CSP.....	16
III.2.2.2 Outil de résolution	17
III.2.2.3 Particularités des fonctions de coût	17
III.2.3 - Délimitation du modèle de preuve de concept	17
III.2.3.1 Choix des espèces maraîchères.....	17
III.2.3.2 Choix des espèces fruitières.....	18
III.2.3.3 Choix des types d'interactions représentés.....	18
III.2.3.4 Choix des règles de fonctionnement représentées	18
III.3 - Résultats	19
III.3.1 - Choix de représentation des connaissances.....	19
III.3.1.1 Représentation spatio-temporelle du verger maraîcher	19
a) Représentation précise de la réalité	19
b) Réduction de complexité de la représentation.....	19

c) Représentation choisie.....	20
III.3.1.2 Variables et domaines.....	20
III.3.1.3 Exemple de traduction d'une interaction au formalisme CSP : perte de lumière sous les arbres	21
a) Description agronomique de l'interaction.....	21
b) Modélisation des caractéristiques des espèces entrant en jeu	21
c) Formalisme CSP.....	22
III.3.2 - Un modèle modulaire et évolutif.....	23
III.3.2.1 Un modèle modulaire	23
III.3.2.2 Un modèle évolutif	23
III.3.3 - Analyse des résultats du modèle de preuve de concept.....	24
III.3.3.1 Scénarios de modélisation	24
a) Typologie des unités spatiales.....	24
b) Fonctions de coût des interactions.....	24
c) Mixité des cultures maraîchères	24
d) Scénarios	24
e) Dispersion des cultures maraîchères	25
III.3.3.2 Exécution des modèles	25
III.3.3.3 Analyse des résultats.....	26
a) Positionnement des arbres	26
b) Mixité des cultures maraîchères	27
c) Positionnement des cultures maraîchères.....	28
d) Une solution adaptée à chaque contexte.....	29
e) Dispersion des cultures maraîchères	30
III.4 - Discussion	31
III.4.1 - Limites de l'étude.....	31
III.4.1.1 Limites du modèle construit	31
III.4.1.2 Portée des résultats analysés.....	32
III.4.2 - La preuve de concept est-elle faite ?	33
III.4.2.1 Valeur démonstrative du modèle.....	33
III.4.2.2 Qualité des résultats.....	33
III.4.3 - Options pour un modèle d'aide à la conception de vergers maraîchers.....	34
IV - Conclusion.....	35
V - Références bibliographiques.....	36
VI - Annexes	41

Table des figures

- Figure 1 : Les interactions entre plantes peuvent être positives et négatives à la fois
- Figure 2 : Interactions souterraines et aériennes entre arbres et cultures
- Figure 3 : Activité photosynthétique en fonction du RPA - Maïs (C4) et coton (C3)
- Figure 4 : Surface équivalente assolée
- Figure 5 : Surface équivalente assolée : exemple de calcul
- Figure 6: Simulation 3D du système racinaire d'un pêcher greffé sur prunier, à 2, 3 et 4 ans
- Figure 7 : Systèmes racinaires d'espèces maraîchères
- Figure 8 : Décalage d'origine des coûts pour représenter des gains
- Figure 9 : Morphologie d'un arbre fruitier modélisé à maturité
- Figure 10 : Représentation spatiale détaillée d'une parcelle de verger maraîcher
- Figure 11 : Représentation spatiale d'une parcelle dans le modèle de preuve de concept
- Figure 12 : Interception de rayonnement solaire - Jour 90
- Figure 13 : Interception de rayonnement solaire - Jour 160
- Figure 14 : Configuration de modélisation de l'interception de rayonnement par les arbres
- Figure 15 : Unités spatiales affectées par la perte de rayonnement solaire
- Figure 16 : Un modèle CSP modulaire
- Figure 17 : Fourchettes min-max d'unités spatiales affectées à chaque culture
- Figure 18 : Résultats de modélisation - Positionnement des arbres
- Figure 19 : Résultats de modélisation - Répartition des cultures maraîchères
- Figure 20 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères – Printemps
- Figure 21 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères - Eté
- Figure 22 : Analyse de dispersion des cultures maraîchères
- Figure 23: Agencement d'arbres sur la parcelle pour des solutions de coûts proches

Table des tableaux

- Tableau 1 : Répartition des temps de travaux (h/ha) en vergers conventionnels - Pomme Gala
- Tableau 2 : Répartition des temps de travaux (h/ha) en vergers conventionnels - Cerise Summit
- Tableau 3 : Mobilisation en azote des cultures légumières
- Tableau 4 : Répartition des temps de travaux par hectare de cultures maraîchères AB
- Tableau 5 : Saisonnalité des cultures maraîchères
- Tableau 6 : Sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire
- Tableau 7 : Fonction de coût pour les espèces maraîchères à l'ombre
- Tableau 8: Fonctions de coût des interactions modélisées – Coûts équilibrés
- Tableau 9 : Fonctions de coût des interactions – Ombre/soleil
- Tableau 10 : Fonctions de coût des interactions - Compétition
- Tableau 11: Fonctions de coût des interactions - Partage
- Tableau 12 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères – Récapitulatif

Liste des abréviations

AFAF : Association Française d'AgroForesterie

CA : Chambre d'Agriculture

ComMod : Compagnon Modelling ; en français Modélisation d'accompagnement

CSP : Constraint Satisfaction Problem ; en français Problème de Satisfaction de Contraintes

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

GRAB : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique

ILP : Integer Linear Programming

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRA PSH : Unité Plantes et Systèmes de culture Horticoles

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

PPAM : Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales

RPA : Rayonnement Photosynthétiquement Actif ; en anglais RPA

SAD : Sciences pour l'Action et le Développement

SEA : Surface Equivalente Assolée ou Surface Equivalente Agroforestière

TAB : Techniques Alternatives et Bio

WCSP : Weighted Constraint Satisfaction Problem ; en français Problème de Satisfaction de Contraintes Pondérées

I - Introduction

Au sein du département Sciences pour l'Action et le Développement (SAD) de l'INRA, dont les missions s'inscrivent dans une approche systémique et pluridisciplinaire de l'innovation agricole et territoriale, l'unité Ecodéveloppement s'est dotée d'un projet scientifique centré sur l'écologisation des pratiques agricoles, c'est-à-dire la prise en compte de l'environnement dans les effets et déterminants des actions agricoles de tous ordres (politiques publiques, politiques privées, pratiques agricoles). Le projet de l'unité consiste en l'étude de systèmes innovants candidats, avec un accent mis sur les pratiques relevant de l'agriculture biologique, et l'analyse multidimensionnelle (agronomie, aspects politiques et socio-économiques, pratiques de consommation, dimension territoriale) des transitions vers ces systèmes innovants.

Dans ce cadre, l'un des systèmes dont l'étude se met en place est le « verger maraîcher », association sur une même parcelle d'arbres fruitiers et de cultures maraîchères. Cette association relevant de l'agroforesterie semble intéressante à plusieurs fins : meilleure exploitation de surfaces agricoles et de ressources naturelles disponibles, plus grande biodiversité devant permettre une lutte biologique naturelle plus efficace contre les maladies et ravageurs, meilleure gestion des aléas (climatiques, commerciaux) par diversification des revenus. Afin de stimuler l'intérêt pour les vergers maraîchers, et voir de plus en plus d'exploitants, maraîchers et/ou arboriculteurs, adhérer à des projets de cette nature, il est nécessaire d'abord d'en montrer les avantages potentiels, puis d'accompagner les exploitants dans des démarches de transition vers des schémas d'exploitation différents de ceux qu'ils maîtrisaient jusqu'alors, dont la conception peut s'avérer complexe, comme le montre la suite de cette étude.

Pour accompagner ces démarches, l'unité Ecodéveloppement propose de mettre en place des modèles pouvant être utilisés lors de phases de co-conception de vergers maraîchers. L'un des modèles envisagés est de type CSP, pour « Constraint Satisfaction Problem » : il pourrait être mis en œuvre dans les phases amont, pour aider les acteurs dans leurs choix initiaux, par la suggestion de schémas de conception participant à étayer leurs réflexions et décisions.

L'objet de l'étude qui suit est une preuve de concept que ce type de modèles serait à même de correctement représenter les mécanismes propres aux associations d'arbres et cultures.

Après une mise en contexte de l'étude et une synthèse bibliographique centrée sur les interactions entre arbres et cultures en système agroforestier, plus particulièrement en système agroforestier horticole, ce document présente les méthodes de construction du modèle CSP de preuve de concept, ainsi que les résultats obtenus devant permettre de valider ou non cette preuve.

II - Partie 1 : Contexte du stage

II.1 - Conception de vergers maraîchers

II.1.1 - Que sont les vergers maraîchers ?

Les vergers maraîchers sont des systèmes agroforestiers horticoles, associant arbres fruitiers et cultures maraîchères. Ce sont des systèmes multi-espèces, multi-strates, qui favorisent les interactions entre espèces, tant aériennes que souterraines, et peuvent tirer bénéfice de ces interactions s'ils sont conçus à cette fin.

Des démarches de natures diverses peuvent mener un exploitant à considérer la mise en place d'un verger maraîcher : il peut s'agir soit d'une démarche de diversification de ses productions dans un souci de gestion des risques (aléas de récolte, aléas de marchés), pour une plus grande stabilité de ses revenus, ou pour répondre aux exigences d'un mode de commercialisation particulier (paniers, ventes à la ferme) ; soit d'une démarche d'intensification de ses productions sur une surface limitée qui ne peut pas être étendue (pression foncière, exploitation péri-urbaine) ; soit encore d'une démarche d'écologisation visant à réduire son utilisation d'intrants externes (produits phytosanitaires, engrais, irrigation) par apport de biodiversité. Chaque type de démarche résulte en des priorités et objectifs distincts pour la conception du verger maraîcher, et les prises de décision qui la jalonnent.

Le processus de mise en place du verger maraîcher, et les contraintes associées, dépendent aussi de la situation initiale de l'exploitation : verger auquel l'exploitant souhaite adjoindre des cultures maraîchères ; ou parcelles de maraîchage dans lesquelles l'exploitant souhaite planter des arbres ; ou encore installation complète d'une nouvelle exploitation dont il faut définir la structure.

II.1.2 - Pourquoi les vergers maraîchers aujourd'hui ?

Les vergers maraîchers ont existé en Europe jusqu'au milieu de XX^{ème} siècle ((Coulon et al., 2000), (Herzog, 1998), (Eichhorn et al., 2006)), puis ont disparu progressivement pour des raisons de mécanisation et de manque de rentabilité à cause des coûts de main d'œuvre. Aujourd'hui, la rentabilité purement économique n'est plus le seul critère d'évaluation des systèmes agricoles, qui se doivent aussi d'être durables, avec un minimum d'impacts environnementaux ((Doré et al., 2011), (Sautereau et al., 2010)). Dans ce contexte, le concept de verger maraîcher est remis à l'étude, notamment en France dans le cadre du projet Durette¹ ou de la plateforme TAB², avec pour objectif la démonstration que ces associations horticoles peuvent être viables économiquement, en tirant bénéfice des principes agroforestiers, comme une meilleure exploitation des ressources disponibles, ou les régulations naturelles entre espèces. En effet, le verger maraîcher est un concept qui s'inscrit dans le paradigme d'une agriculture plus écologique, au sens de plus de biodiversité, mais aussi au sens de plus de durabilité, tant du point de vue agronomique, par une désintensification des plantations fruitières et une protection biologique naturelle devant limiter l'utilisation d'intrants, que du point de vue socio-économique, par un modèle d'exploitation aux cultures horticoles diversifiées, moins sujette aux aléas climatiques ou commerciaux.

Les vergers maraîchers qui font l'objet de cette étude sont des systèmes innovants qui débutent par une phase de conception préliminaire à leur implémentation, dans le but de tirer le meilleur parti des associations d'arbres et de cultures qui les composent, en tenant compte de leurs évolutions dans l'espace et dans le temps.

¹ Projet de verger maraîcher en cours de conception à l'initiative du GRAB (Groupe de Recherche en Agriculture Biologique), à des fins pédagogiques et de démonstration.

² Techniques Alternatives et Bio : plateforme expérimentale installée dans la Drôme, dont la mission générale est « réorienter les systèmes de production vers plus de durabilité », et dont l'un des axes de travail est intitulé « des vergers et cultures assolées ».

Différents types de modélisation des systèmes de culture

Les modèles utilisés pour la planification de systèmes agricoles s'appuient communément sur des techniques d'**optimisation**, ou **programmation par objectifs** : le problème est posé avec un ou plusieurs objectifs à optimiser (maximiser ou minimiser), et le modèle produit en sortie une solution optimale par rapport à ces objectifs. Par exemple, le problème de choix d'assolement des cultures est posé avec un objectif de maximisation des revenus sur l'exploitation, ou mieux avec des objectifs complémentaires de maximisation des revenus et de minimisation des impacts sur l'environnement (Annets, Audsley, 2002). Pour représenter un certain degré d'incertitude exprimé par l'exploitant, ces types de modèles offrent la possibilité de définir des objectifs « flous », c'est-à-dire des objectifs exprimés avec un intervalle de tolérance autour d'une valeur optimale visée (Biswas, Pal, 2005).

Les modèles de **simulation** sont mis en œuvre dans des contextes d'aide à la décision pour des choix de gestion des exploitations. Dans ces modèles, les règles régissant le fonctionnement du système étudié sont décrites, devant permettre de simuler son comportement dans différentes situations. La simulation se fait à partir d'un état initial choisi du système (système connu, ou nouveau système dont on a choisi une description), sur lequel on applique les règles du modèle pour obtenir des états ultérieurs du système ; plusieurs scénarios possibles peuvent être simulés sur la base d'états initiaux différents, constituant des hypothèses formulées par les acteurs. Ces types de modèles sont utilisés dans la démarche ComMod, de modélisation d'accompagnement. Un exemple est la simulation de dynamiques d'évolution de fermes d'élevage dans diverses hypothèses d'aménagements agroforestiers (Etienne, Rapey, 1998) : sur la base de scénarios choisis par les agriculteurs, c'est-à-dire des choix possibles d'aménagement de leurs parcelles, le modèle simule les dynamiques d'évolution de l'exploitation sur 30 ans. Les résultats de ces simulations incluent des indicateurs tant économiques, comme la production de fourrage ou le temps de travail, qu'environnementaux, comme la qualité du paysage ; ces résultats stimulent les discussions entre acteurs, et leur permettent d'étayer leurs décisions selon des objectifs à moyen ou long terme.

Les **problèmes de satisfaction de contraintes** (notés CSP, pour Constraint Satisfaction Problems) sont des modèles intermédiaires entre optimisation et simulation : ils ne cherchent pas une solution optimale, mais peuvent trouver plusieurs solutions, qui sont autant de scénarios possibles à analyser par les acteurs.

Contrairement aux modèles d'optimisation, aucun optimum n'est formellement recherché dans les problèmes de type CSP, mais seulement un « **espace des possibles** », à savoir les jeux de valeurs possibles des variables qui satisfont l'ensemble des contraintes. Il en résulte que plusieurs solutions peuvent répondre au problème posé, parmi lesquelles l'utilisateur est susceptible de faire son choix sur la base de critères qui lui sont propres, mais ne sont pas modélisés sous forme de contraintes.

Contrairement à la simulation, il n'est pas nécessaire de fixer l'état initial du système : le modèle CSP recherche les solutions possibles qui satisfont les contraintes sur toute la durée de l'horizon étudié ; la détermination d'un état initial possible fait partie de la solution recherchée, sans restrictions a priori.

II.1.3 - Comment concevoir les vergers maraîchers ?

II.1.3.1 *Accompagner la conception à l'aide de modèles*

En contrepartie de ses atouts, le verger maraîcher est un système complexe à gérer, en proportion du nombre et de la variabilité des espèces choisies, et avant cela un système complexe à concevoir, pour s'assurer d'un fonctionnement viable sur le moyen ou long terme, en intégrant les évolutions pluriannuelles des arbres. Afin de mettre en confiance les exploitants agricoles, et les aider à entreprendre des projets de vergers maraîchers, les équipes de l'INRA et du GRAB commencent à mettre en place des démarches d'accompagnement, si possible instrumentalisées d'outils adéquats, devant permettre de mieux appréhender la complexité. Parmi ces outils figure la modélisation du système candidat, qui peut prendre diverses formes (voir encart ci-contre).

Comme décrit dans la charte ComMod, de modélisation d'accompagnement (ComMod, 2005), les démarches de co-conception, associant chercheurs et acteurs de terrain, utilisent les modèles comme outils de structuration des échanges dans un « processus itératif de compréhension, de confrontation et d'analyse ». L'objectif de ce processus n'est pas de « trouver la meilleure solution, mais de se donner les moyens de prendre en charge au mieux les incertitudes de la situation examinée en commun ».

Les possibilités offertes par les modèles de type CSP, pour « Constraint Satisfaction Problem », couvrent bien ces besoins de modélisation d'accompagnement, qui pourrait être mise en œuvre lors de démarches de co-conception de vergers maraîchers. En effet, ces types de modèles sont bien adaptés aux situations dans lesquelles il n'est pas possible, ou pas souhaité, de faire des choix a priori sur la solution, comme cela est requis pour les simulations. De plus, l'obtention de plusieurs solutions possibles, et non une seule comme dans les cas d'optimisation, permet aux parties prenantes de la démarche de co-conception de se positionner en réels acteurs de la décision, sur la base de discussions et d'expressions de leurs critères de choix autour des solutions proposées. Les modèles de type CSP apportent en outre l'avantage de pouvoir être utilisés de façon itérative au cours de la maturation de la conception : il est possible de commencer avec un jeu de contraintes peu étoffé représentant la partie des connaissances bien maîtrisées par les acteurs, puis au fur et à mesure des discussions conjointes sur les solutions possibles, d'ajouter des contraintes représentant des points sur lesquels les acteurs se sont mis d'accord.

II.1.3.2 *Modéliser l'espace et le temps*

Dans le cas des vergers maraîchers, associant des cultures pérennes et des cultures de cycles courts, la question essentielle qui se pose aux concepteurs est la suivante :

« Comment agencer dans l'espace et dans le temps des cultures fruitières et maraîchères sur une parcelle en tirant le meilleur parti des interactions agroforestières tout en maintenant quantité et mixité des productions à moyen et long termes ? »

Pour répondre correctement à cette question, il faut modéliser conjointement les dimensions spatiales et temporelles du système. D'un point de vue spatial il faut déterminer le positionnement relatif des arbres fruitiers et des cultures maraîchères, en intégrant l'occupation spatiale de chaque élément en trois dimensions, tant dans sa partie aérienne, pour bien prendre en compte les effets d'ombrage des arbres, que dans sa partie souterraine. Une représentation spatiale du verger maraîcher à un instant donné n'est néanmoins pas suffisante pour analyser son agencement : les choix de conception du verger, en particulier le positionnement des arbres, doivent être pérennes pour toute la durée de vie estimée des arbres (plusieurs dizaines d'années), sans possibilité de restructurer l'espace à chaque saison maraîchère (quelques mois). Il faut donc considérer, dès la conception, les différents états que pourront prendre les arbres et cultures au cours du temps, qui ont un impact sur les productions et les répartitions de charges de travail : changement à chaque saison culturale pour le maraîchage, changement au fil des années pour les phases de maturation des arbres fruitiers.



(tiré de (Hunter, Aarssen, 1988))

Figure 1 : Les interactions entre plantes peuvent être positives et négatives à la fois

Les modèles de type CSP ont déjà été expérimentés avec succès pour représenter l'allocation spatio-temporelle des cultures d'une exploitation (Akplogan et al., 2013) : ce sont donc de bons candidats pour modéliser les vergers maraîchers, à condition d'être capable de représenter de façon satisfaisante les connaissances caractérisant les spécificités des systèmes étudiés.

II.1.4 - Construction et évaluation d'un modèle CSP de preuve de concept

L'objectif du stage faisant l'objet de ce mémoire est une preuve de concept que des modèles de type CSP pourraient être mis en œuvre pour répondre aux questions d'agencement spatio-temporel de vergers maraîchers. Il s'agit d'évaluer si ce type de modèles est adapté à la représentation des interactions entre arbres et cultures, et à la combinaison optimale de ces interactions pour déterminer l'évolution de l'occupation d'une parcelle associant arbres et cultures.

Une étape préliminaire à la construction de ce modèle de preuve de concept est la constitution d'une base de connaissances à représenter. Les vergers maraîchers en tant que tels ne faisant à ce jour l'objet d'aucune étude scientifique bien formalisée, la constitution de cette base est articulée selon deux axes. Premier axe, une recherche bibliographique (voir paragraphe II.2 -) sur les systèmes agroforestiers et les caractéristiques des cultures horticoles susceptibles d'interagir dans le verger maraîcher. Cette recherche centralise les connaissances acquises et formalisées sur d'autres systèmes agroforestiers qui sont jugées applicables aux vergers maraîchers : principes de complémentarité d'utilisation des ressources, par le biais de cycles culturels décalés et de compartimentage racinaire, nécessité de vision systémique pluriannuelle pour une conception viable sur le moyen ou long terme. Second axe, l'acquisition de connaissances empiriques non formalisées détenues par des experts qui interviennent sur des projets connexes aux vergers maraîchers : observations et pratiques en matière de choix de positionnement des arbres sur les parcelles, de tolérance à l'ombre et sensibilité à la sécheresse des cultures maraîchères, de régulations naturelles ou effets inhibiteurs entre espèces d'arbres fruitiers et de cultures maraîchères, de gestion du sol près des arbres fruitiers (travail du sol, couverture du sol, cultures au pied des arbres), et d'organisation du travail au fil des saisons (notamment lors des récoltes de fruits).

II.2 - Synthèse bibliographique

II.2.1 - Propriétés des systèmes agroforestiers

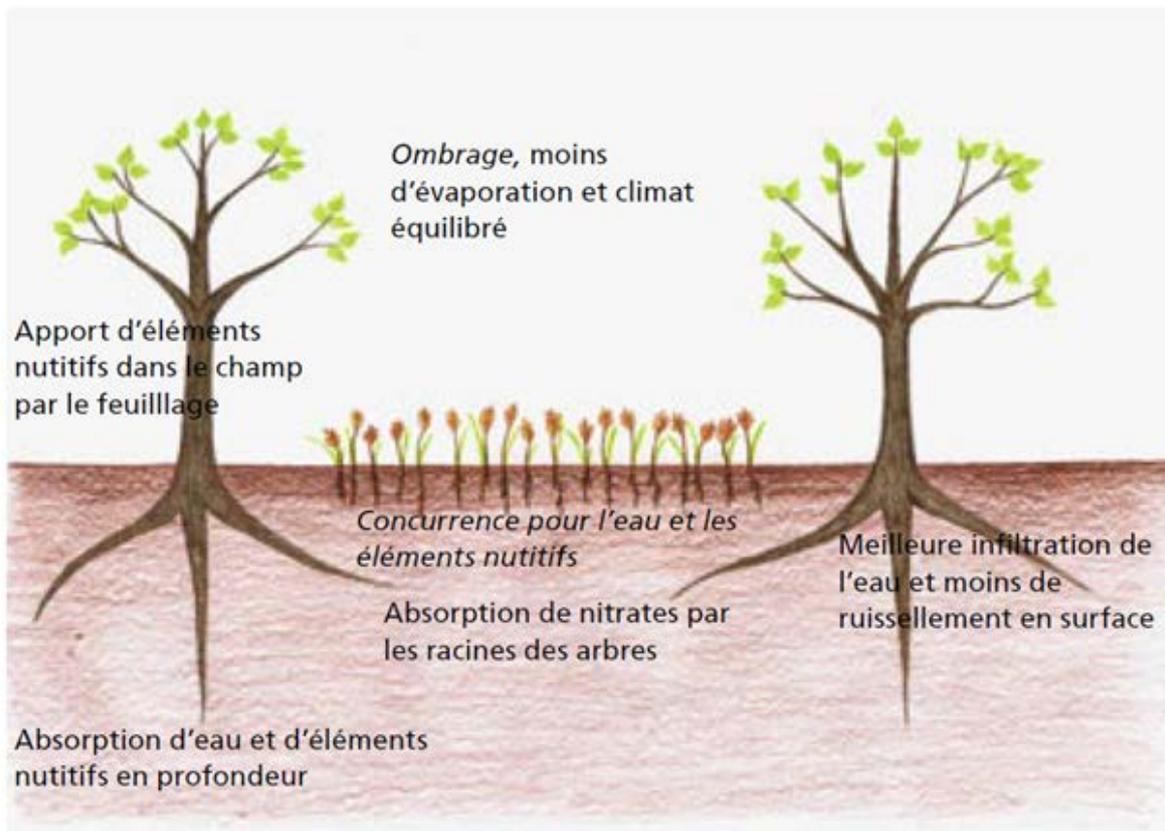
Selon la définition de l'Association française d'agroforesterie (AFAF), « l'agroforesterie désigne l'association d'arbres et de cultures ou d'animaux sur une même parcelle agricole, en bordure ou en plein champ ». Les arbres se différencient des cultures par leur pérennité sur la parcelle, contrairement aux cultures qui sont saisonnières, au maximum annuelles (Eichhorn et al., 2006). Dans la suite de ce document, on utilise les termes d'arbres et cultures pour désigner respectivement les cultures pérennes et les cultures saisonnières.

Dans l'objectif d'une application aux vergers maraîchers, l'étude bibliographique qui suit se restreint aux pratiques agroforestières végétales, sans association d'animaux sur les parcelles, aussi appelées « agrisylviculture » (Dupraz, 1994), traduction de l'anglais « sylvoarable systems ».

II.2.1.1 Principes de base de l'agrisylviculture

Le fonctionnement d'un système agroforestier repose sur une **meilleure utilisation des ressources disponibles** dans un milieu : il ne peut être fructueux que si ce milieu présente un potentiel de récupération de ressources non captées en conditions de monoculture (Malézieux et al., 2009). La captation de ces ressources par des cultures complémentaires entraîne une utilisation plus importante de toutes les autres ressources disponibles dans le milieu, et donc une production de biomasse plus importante (Jose et al., 2004).

Le bon fonctionnement des associations est conditionné par le **pédoclimat**, qui détermine les facteurs limitants du système à un instant donné. En Europe, les facteurs limitants des systèmes



(tiré de (Kaeser et al., 2010))

Figure 2 : Interactions souterraines et aériennes entre arbres et cultures

agroforestiers dépendent de la latitude : lumière dans le nord de l'Europe, eau dans le sud (Eichhorn et al., 2006). Etant donné que la majeure partie du partage des ressources se fait au niveau des systèmes racinaires, la nature et la profondeur des sols jouent un rôle prépondérant dans les interactions agroforestières.

Au-delà du partage ou de l'utilisation complémentaire de ressources, des espèces peuvent **s'influencer mutuellement** (Figure 1), soit négativement (compétitions, inhibitions), soit positivement (facilitations, mutualismes), soit même parfois les deux simultanément (Bruno et al., 2003). Il est souvent difficile de déterminer les influences relatives de toutes ces interactions : un comportement global du système peut être observé, sans forcément être capable d'isoler chaque facteur (Hunter, Aarssen, 1988).

Dans leur revue sur les « interactions interspécifiques en agroforesterie tempérée », (Jose et al., 2004) expliquent que les **compétitions** sont fréquentes dans les systèmes agroforestiers, à partir du moment où deux espèces en présence ont besoin de la même ressource au même endroit, au même moment. Les conséquences des compétitions sont plus ou moins préjudiciables à la survie du système, mais elles ne sont pas forcément négatives, si en contrepartie elles assurent une meilleure utilisation globale des ressources (Schroth, 1998).

Les **inhibitions** par présence de substances allélopathiques ont été étudiées dans les associations de légumes, ou entre légumes et plantes aromatiques ; par exemple, la tomate émet des substances volatiles ayant montré un effet inhibiteur sur le concombre (Deng et al., 2010), sur la laitue et sur la vigne (Kim, 2001). Toutefois, très peu d'études existent sur les inhibitions entre arbres et cultures, si ce n'est le cas de la juglone, substance allélopathique produite par les noyers et noisetiers (Jose et al., 2004).

Il y a **facilitation** entre deux plantes lorsqu'au moins l'une des plantes de l'association tire bénéfice de cette association ; on parle de **mutualisme** lorsque les deux plantes tirent bénéfice de l'association (Bruno et al., 2003). Un cas de facilitation reporté sous tous les climats est le « nurse plant syndrome », par lequel des semis d'une espèce se développent beaucoup mieux sous la protection des plantes adultes d'une autre espèce ; ce peut être dû par exemple à une température ou un taux d'humidité du sol plus propices à la germination sous la végétation (Callaway, 1995). Un autre cas de facilitation est une plante qui attire plus les pollinisateurs, et en fait bénéficier ses voisines, moins attractives (Hunter, Aarssen, 1988).

(Malézieux et al., 2009) dressent un inventaire des interactions entre espèces dans les systèmes de culture : ces interactions, positives ou négatives, sont souvent propres aux espèces associées, voire même aux individus d'une même espèce, qui peuvent présenter des interactions différentes sur une même parcelle. Ces constats rendent hypothétiques, voire dangereuses, les extrapolations de résultats d'expérimentations, pouvant mener à la conception de systèmes nécessitant encore plus d'intrants pour remédier à des associations qui s'avèrent finalement non favorables (Eichhorn et al., 2006). Par ailleurs, les interactions entre deux espèces peuvent évoluer au cours du temps en fonction de leurs propres évolutions : dans leur revue, (Smith et al., 2013) analysent le potentiel productif des associations arbres-cultures : ils mettent en évidence que la balance entre interactions positives et négatives peut basculer en fonction de la maturité des arbres, passant d'un système complémentaire, avec dominance d'interactions positives, à un système compétitif, avec dominance d'interactions négatives.

Pour être exhaustive, l'étude d'un système agroforestier doit se faire à **diverses échelles** : dans la suite de ce chapitre sont détaillées les propriétés des systèmes agroforestiers (Figure 2), selon des échelles d'observation croissantes :

- Interactions souterraines, dans les zones de colonisation racinaire ;
- Interactions aériennes, dans les zones de croissance de la végétation ;
- Diversification des cultures et efficacité économique, à l'échelle du système.

II.2.1.2 Interactions souterraines : eau et éléments nutritifs

Le principe de meilleure utilisation des ressources communes disponibles dans le milieu au cours de l'année peut se concrétiser sous diverses formes : soit les plantes associées ont des **cycles de croissance décalés** (Schroth, 1998), permettant une utilisation des ressources sur des périodes plus grandes (Ouma, Jeruto, 2010) ; soit ces plantes ont des développements racinaires différents, ce qui permet un **compartimentage des ressources souterraines** (eau, éléments nutritifs), et la récupération par les racines profondes de ressources qui ne seraient pas captées sinon, comme par exemple de l'azote lixivié (Jose et al., 2004). Cette récupération en profondeur est optimale si les racines des arbres peuvent se rejoindre sous les cultures.

Systèmes racinaires

Bien que les arbres et cultures aient globalement des systèmes racinaires différents (Malézieux et al., 2009), avec des racines s'enfonçant plus en profondeur pour les arbres, d'importantes concentrations de racines d'arbres ont été observées dans les couches superficielles du sol (moins de 30 cm), sous tous les climats, indiquant que le potentiel de compétition avec les cultures est bien présent dans cette zone (Jose et al., 2004). L'enracinement dépend des conditions de croissance : en conditions de compétition, les systèmes racinaires de nombreuses espèces font preuve de grande plasticité, leur conférant des capacités d'extension autant en largeur qu'en profondeur pour trouver leurs nutriments (Jose et al., 2004).

Dans sa revue sur les possibilités de gestion des interactions souterraines en agroforesterie, (Schroth, 1998) explique que le développement des systèmes racinaires peut aussi être influencé par les calendriers de fertilisation, par les choix d'intervention de taille des arbres, et par la couverture du sol, mais qu'il est difficile d'édicter des règles de gestion « universelles » pour obtenir un résultat donné, qui dépend des espèces en présence et des contextes pédoclimatiques.

Partage de l'eau

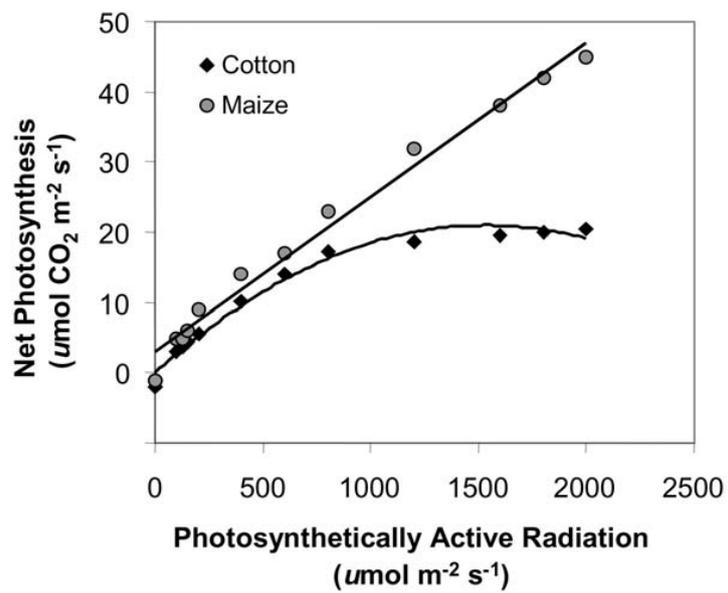
L'association arbres-cultures favorise une **meilleure utilisation de l'eau disponible**, d'abord grâce à une moindre évapotranspiration sous les arbres, par effet d'ombrage rendant l'air et le sol plus humides (Cannell et al., 1996) ; ensuite grâce à de meilleures infiltration et rétention d'eau dans le sol, par accroissement de la matière organique apportée par la biomasse produite (Dupraz, Liagre, 2011, p. 41) ; enfin grâce à des remontées capillaires par les racines profondes des arbres vers les racines superficielles des cultures (Burgess et al., 1998).

En contexte **d'irrigation** des cultures annuelles, l'eau apportée en surplus sur les cultures peut être récupérée par les arbres si leurs racines sont plus profondes, avec dans les cas favorables la possibilité d'une réduction, voire une suppression, de l'irrigation des arbres.

Partage des éléments nutritifs

Comme pour l'eau, l'association arbres-cultures favorise une **meilleure utilisation des éléments nutritifs disponibles**, d'une part parce qu'arbres et cultures sont susceptibles de capter des minéraux de façon complémentaire dans le temps (cycles de croissance décalés) et dans l'espace (compartiments racinaires différents), permettant d'assurer un meilleur rendement global avec les mêmes ressources ; d'autre part parce que les arbres sont capables d'utiliser des formes chimiques d'éléments non utilisables directement par les cultures (Cannell et al., 1996).

Comme pour l'irrigation, la **fertilisation** apportée en surplus sur les cultures annuelles peut bénéficier aux arbres, et le cas échéant autoriser la réduction, voire l'impasse de fertilisation sur les arbres. (Nissen et al., 1999) détaillent un exemple d'association chou-eucalyptus dans lequel les arbres captent une partie de l'azote non utilisé par les cultures, permettant d'améliorer l'efficacité globale de l'engrais azoté apporté aux choux.



(tiré de (Jose et al., 2004))

Figure 3 : Activité photosynthétique en fonction du RPA - Maïs (C4) et coton (C3)

Compétitions

Dans la plupart des systèmes agroforestiers, une compétition existe entre les plantes, dès lors qu'une partie de leurs racines occupe les mêmes horizons du sol. En zone tempérée, et plus particulièrement en climat méditerranéen, la compétition la plus fréquente est celle pour l'eau en période estivale. Dans leur revue, (Jose et al., 2004) mentionnent que de façon générale, cette **compétition pour l'eau** est montrée cause première des pertes de rendements sur les cultures en système agroforestier, avec principalement des hauteurs de plantes et des tailles de feuilles réduites, mais que les pertes de rendement par compétition pour les nutriments sont moins observées car les études sont faites dans des environnements bien fertilisés. De façon logique, la compétition pour l'eau est prépondérante, puisque si une plante n'a pas suffisamment d'eau, elle se développe moins et a donc moins besoin de nutriments.

II.2.1.3 Interactions aériennes : lumière, ombre et occupation de la surface cultivable

Interception de la lumière

De par une présence végétale plus continue (Cannell et al., 1996) et des jeux de réflexions entre arbres et cultures (Dupraz, Liagre, 2011, p. 41), les systèmes agroforestiers interceptent une plus grande portion de radiation solaire disponible annuellement, ce qui entraîne une **augmentation de l'activité photosynthétique** sur une même surface cultivée. Ceci est d'autant plus vrai que les arbres et cultures associés ont des cycles de croissance plus décalés, et qu'ils ont des architectures différentes (Ouma, Jeruto, 2010), comme dans les systèmes en nombreuses strates.

Les arbres, éléments les plus hauts de ces systèmes, interceptent une partie de la lumière sous leurs houppiers durant les mois de l'année où ils portent des feuilles ; leur **potentiel d'interception du rayonnement solaire** varie au cours de l'année, et au cours de chaque journée, en fonction de l'élévation du soleil (distance avec le point éclairé) et de l'inclinaison de ses rayons (Palmer, 1977).

Perte de lumière sous les arbres

La bibliographie offre de nombreux arguments et exemples contradictoires quant à savoir comment **l'ombre affecte le développement des cultures sous les arbres**.

Comme l'expliquent (Jose et al., 2004) dans leur revue : d'un point de vue purement physique, l'ombre des arbres modifie la composition du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) reçu par les cultures, interceptant principalement les radiations rouges et bleues ; or, le manque de rayonnement de longueurs d'ondes correspondant aux rouges est préjudiciable à la croissance des cultures. Toutefois, le préjudice subit devrait atteindre différemment les plantes en C3 (la plupart des espèces cultivées en zone tempérée, à part le maïs) et les plantes en C4 (la plupart des espèces cultivées en zone tropicale) : en effet, les plantes en C3 ont une activité photosynthétique proportionnelle au RPA de composition standard qu'elles reçoivent, jusqu'à un seuil correspondant à 50% de la radiation maximale, à partir duquel leur activité photosynthétique n'augmente plus, contrairement aux plantes en C4 qui ne présentent pas ce seuil (voir Figure 3). Les plantes en C3 ne devraient donc en principe pas être affectées par une ombre laissant passer au moins 50% du rayonnement naturel, dans la mesure où toutes les radiations sont réduites dans les mêmes proportions.

Des exemples contradictoires ((Miah et al., 2010), (Miah et al., 2008), (Dauzat, Eroy, 1997), (Nissen et al., 1999), (Newman, 1986)) incitent à la prudence quant à l'édiction de règles concernant l'impact de l'ombre des arbres sur les cultures. L'impact potentiel doit être évalué au cas par cas, en fonction du rayonnement solaire et des variétés associées, sachant que les pertes dues à l'ombre des arbres doivent être relativisées par rapport à celles, toujours plus significatives, dues à la compétition pour l'eau décrites au paragraphe II.2.1.2 (Jose et al., 2004).

Microclimat sous les arbres

La diminution du rayonnement solaire sous les arbres crée un **microclimat** (Smith et al., 2013) qui a des avantages, en particulier pendant les saisons chaudes : les stress thermiques peuvent y être réduits, par diminution des températures de l'air et du sol (Dupraz, Liagre, 2011, p. 41). Des expérimentations en Floride (latitude 28°N) ont montré que l'ombre a un effet plutôt réducteur sur les cultures précoces de légumes (printemps), mais permet de meilleurs rendements pour les cultures plus tardives (été), par une baisse de température et un maintien de l'humidité quand le soleil est plus intense (Valli et al., 1965) (Young, 1961). De façon générale, les légumes feuilles produisent plus de biomasse à l'ombre en été (Ingawale et al., 2004) ; par exemple à Hawaii (latitude 21°N), de meilleurs rendements avec une irrigation réduite ont été expérimentés sur des laitues et choux sous ombrage (Wolff, Coltman, 1990).

Néanmoins, il faut être vigilant au fait que l'humidité maintenue sous les arbres, d'autant plus grande que la densité d'arbres est importante, peut créer une ambiance plus propice aux maladies fongiques et au parasitisme. Elle peut aussi favoriser le développement des limaces, qui sont néfastes aux cultures (Griffiths et al., 1998).

Partage de l'espace

Le partage de l'espace sur une parcelle est d'abord structuré par les choix de positionnement des arbres et leur densité de plantation, puis par les choix de positionnement des cultures entre et sous les arbres.

La densité d'arbres plantés sur la surface cultivable détermine une stratégie de conduite du système agroforestier dans son ensemble (Dupraz, Liagre, 2011, p. 51-61) :

- Stratégie stable : faible densité d'arbres (moins de 80/ha) ; cultures possibles sur toute la surface jusqu'à l'abattage des arbres.
- Stratégie évolutive : densité d'arbres moyenne (jusqu'à 200/ha) ; surface cultivable diminuant au cours du temps ; stratégie permettant les plus fortes SEA (Surface Equivalente Assolée) sur la durée de vie du système.
- Stratégie éphémère : forte densité d'arbres (plus de 200/ha) ; cultures possibles seulement quelques années avant peuplement forestier.

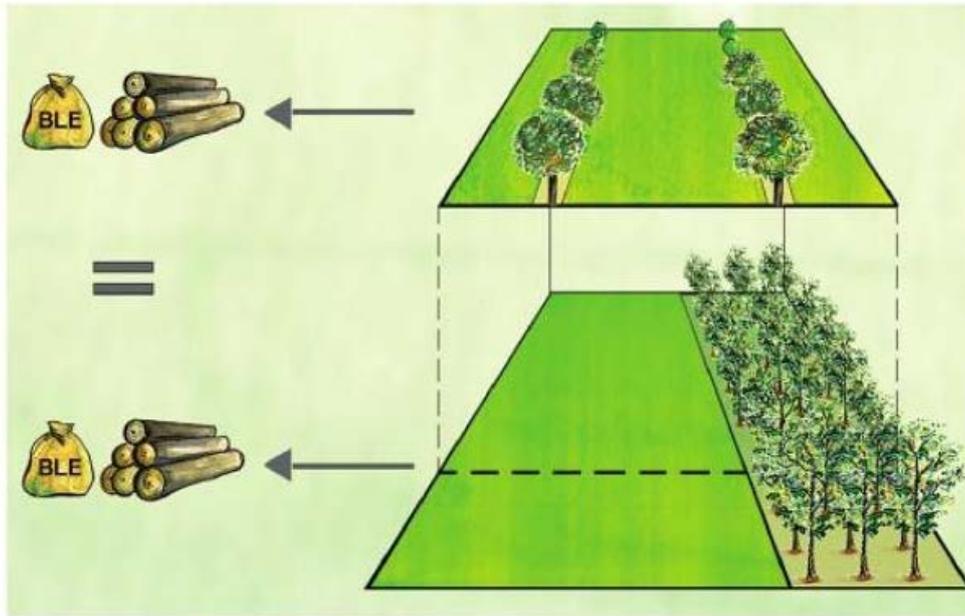
Le choix de cultiver sous les arbres ou de garder des distances non cultivées autour de leurs troncs doit être fait au cas par cas en fonction des espèces choisies, et peut varier au cours de la vie des arbres. Ce choix doit aussi tenir compte des périodes d'entretien des arbres, pendant lesquelles il est préférable que les interventions se fassent en l'absence de cultures sur la zone.

II.2.1.4 Diversification des cultures : les atouts d'une plus grande biodiversité

Par comparaison aux monocultures, les parcelles aux cultures diversifiées présentent une plus grande biodiversité, ce qui rend ces systèmes de culture plus stables, plus rentables et plus durables (Trenbath, 1999). Les apports de la biodiversité sont d'autant plus marqués que le nombre d'espèces en présence est plus important, et que les espèces sont plus imbriquées, comme c'est le cas dans les systèmes en strates multiples (strates herbacées, arbustives, arborées).

Divers facteurs favorisant une plus grande biodiversité peuvent être pris en compte dans les choix de conception des systèmes. Certains de ces facteurs sont analysés par (Simon et al., 2010) dans leur revue sur la biodiversité dans les vergers : la couverture des sols autour des arbres, par opposition aux sols nus, est bénéfique à la présence d'insectes dans les arbres fruitiers ; la diversité des variétés d'arbres, avec des morphologies et tailles différentes, est favorable aux auxiliaires ou aux prédateurs, en particulier si elle assure la connectivité entre les éléments pérennes du paysage, permettant à la faune de se déplacer entre habitats ; la présence de haies, de bandes enherbées ou fleuries, ainsi que l'introduction de PPAM peuvent être bénéfiques, en gardant toutefois à l'esprit que certaines haies sont susceptibles d'héberger des ravageurs et maladies.

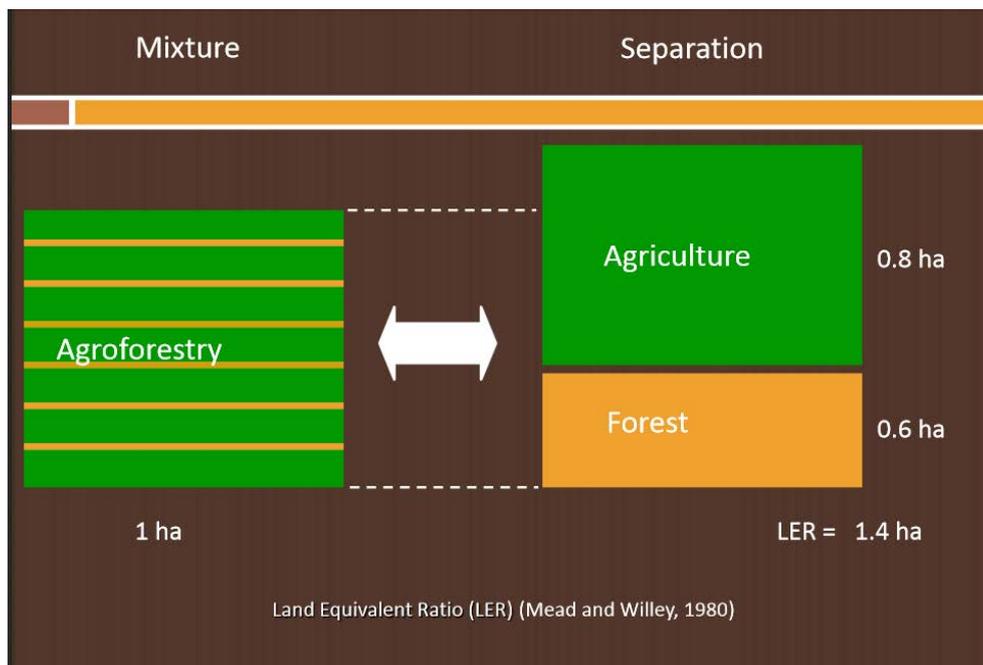
Un exemple de système à forte biodiversité sont les haies fruitières à haute densité du Conservatoire végétal régional d'Aquitaine à Montesquieu (Lot-et-Garonne) : ce sont des associations de strates



(tiré de (Dupraz, Liagre, 2011))

Figure 4 : Surface équivalente assolée

Surface nécessaire d'arbres et cultures séparés pour produire autant qu'un hectare agroforestier



(tiré de (Dupraz, Talbot, 2012))

Figure 5 : Surface équivalente assolée : exemple de calcul

arborées de fruitiers d'espèces et variétés différentes, et de strates arbustives également fruitières, formant un milieu linéaire complexe ininterrompu (contrairement à une ligne d'arbres peu dense sans strate arbustive) ; le résultat est un système de culture fruitière autoprotégé, qui n'a quasiment plus besoin de traitements phytosanitaires (Evelyne Leterme dans (ITAB et al., 2012)).

La biodiversité fonctionnelle apportée par les arbres et cultures en présence joue un rôle dans la **lutte biologique** contre ravageurs et maladies : la diversité des habitats et leur pérennité offrent un hébergement à des auxiliaires de natures variées (oiseaux, insectes), qui se maintiennent au fil des saisons (Simon et al., 2010) ; la diversité de la flore attire une faune plus abondante et diversifiée, comportant une plus grande population d'auxiliaires, mais aussi parfois de ravageurs (Smith et al., 2013). Il faut retenir qu'il est très difficile d'identifier correctement les associations d'espèces bénéfiques ou nuisibles pour le contrôle des bioagresseurs dans un contexte donné (Simon et al., 2010), et qu'il n'est donc pas du tout évident d'en tenir compte a priori dans des conceptions de systèmes.

Un autre facteur, plus tangible, joue en faveur de la lutte biologique dans les systèmes agroforestiers : la diminution de la densité de plantes d'une même espèce sur une parcelle est un moyen de limiter la propagation des ravageurs et maladies de cette espèce (Ouma, Jeruto, 2010) ; par exemple, les vergers intensifs actuels sont plantés à des densités de 1200 à 3000 arbres/ha (GRCETA Basse Durance, 2004), contre un maximum de 200 arbres/ha recommandé dans les systèmes agroforestiers.

II.2.1.5 Efficience des systèmes agroforestiers : indicateurs économiques et organisation du travail

Comme évoqué dans les paragraphes précédents, l'objectif premier des systèmes agroforestiers est la meilleure utilisation possible de l'espace et des ressources naturelles disponibles. Ce qui importe est **l'efficience globale du système**, même si pour l'une des cultures, le rendement en association peut se révéler moindre que celui qu'il serait en culture pure.

Les paramètres d'efficience du système varient au cours de la vie des arbres : dans la période de croissance d'arbres jeunes, les cultures permettent d'assurer un revenu parallèle sans pénaliser la croissance des arbres (Ouma, Jeruto, 2010). Plus tard, les surfaces de culture sont le plus souvent diminuées mais les arbres apportent de la production en contrepartie (fruits et/ou bois) ; les systèmes les plus rentables sont ceux qui laissent la place à des cultures pendant toute la durée de la vie des arbres (Smith et al., 2013), c'est-à-dire les stratégies agroforestières stable ou évolutive décrites au paragraphe II.2.1.3.

En complément de mesures de rendement à connotation purement économique les plus couramment rencontrées, comme la surface équivalente assolée (SEA), ou LER (Land Equivalent Ratio), illustrés en Figure 4 et Figure 5, il serait souhaitable d'utiliser aussi un indicateur représentant le « **degré de biodiversité** » du système agroforestier, et ainsi mieux estimer ses apports réels. Ce type d'indicateur ne se mesure pas directement en termes économiques, mais a néanmoins une valeur, notamment pour la protection des cultures du système, et plus globalement pour un ensemble de services écosystémiques fournis à la communauté (Smith et al., 2013). En effet, le potentiel de régulation d'un système diversifié ne s'arrête pas aux limites du verger, mais peut se propager au territoire alentour (Simon et al., 2010).

La **rentabilité du système**, et donc sa viabilité, sont une balance entre, d'une part les productions de l'exploitation, le plus souvent globalement supérieures en système agroforestier qu'en monocultures juxtaposées (Smith et al., 2013), d'autre part les coûts associés, en particulier les coûts de main d'œuvre. La mise en place de cultures diversifiées a des impacts sur **l'organisation des travaux** de l'exploitation : besoin de compétences élargies, allongement des temps de travaux par morcellement des surfaces, nécessité de changements d'activité plus fréquents, diminution de la mécanisation (Coulon et al., 2000). En contrepartie de ces impacts négatifs sur la charge de travail, il y a possibilité de meilleure répartition des travaux sur l'année, selon les types de cultures

(Malézieux et al., 2009), et de mutualisation de certaines interventions. Les contraintes d'organisation du travail sont très dépendantes des cultures choisies, et de leur arrangement spatial : elles sont un facteur essentiel à considérer lors de la conception d'un système agroforestier, sans oublier une évolution de la répartition des tâches au cours de la vie des arbres.

Les principes de base et propriétés des systèmes agroforestiers présentés ci-dessus sont applicables aux vergers maraîchers, en les adaptant aux caractéristiques des arbres et des cultures qui les composent. Ceci fait l'objet du paragraphe suivant de cette bibliographie.

II.2.2 - Caractéristiques des productions horticoles

II.2.2.1 *Caractéristiques des arbres fruitiers*

Ce paragraphe détaille les caractéristiques des arbres fruitiers qui sont susceptibles d'entrer en jeu dans le fonctionnement d'une parcelle agroforestière. Un arbre fruitier est avant tout conditionné par son matériel végétal, qui influence ses caractéristiques, étudiées ci-après : système racinaire, facteurs de croissance et fructification, besoins en eau et minéraux, itinéraires techniques.

Matériel végétal

Le **choix des variétés** d'arbres fruitiers, et de leurs **porte-greffes**, est déterminant pour toute la vie du verger : il doit se faire en fonction des objectifs de l'exploitant (vigueur, productivité, dimensions de l'arbre) et des itinéraires techniques envisagés (tailles, traitements) (Leterme, 2012b).

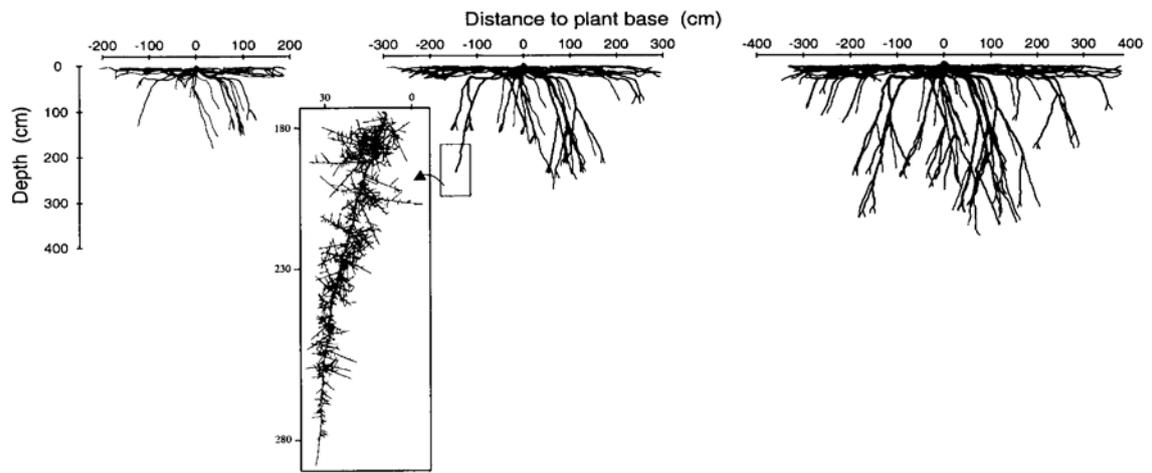
La majorité des vergers intensifs actuels en France utilise des porte-greffes peu vigoureux, de type M9 (GRCETA Basse Durance, 2004), qui donnent des arbres de volume aérien adapté à des interventions faciles, avec une mise à fruits rapide, et de bonnes quantités et régularité de production ; en contrepartie, ils ont des systèmes racinaires très superficiels, résidant dans les 50 premiers centimètres du sol, et nécessitant irrigation et fertilisation régulières.

A l'inverse, des porte-greffes plus vigoureux, de type M7 ou M106, donnent des arbres avec un développement végétatif plus important, rendant les interventions plus complexes, parfois au détriment des productions ; ils ont des systèmes racinaires plus vigoureux, qui s'étendent plus profondément et latéralement, et supportent de moindres fertilisation et irrigation. Ce type d'arbres vigoureux, avec des systèmes racinaires développés, est à privilégier dans le cadre d'associations avec des cultures, afin de bénéficier du compartimentage des ressources souterraines.

Systèmes racinaires

Le système racinaire des arbres fruitiers se développe plus dans les premières années de l'arbre, avant qu'il ne commence à donner des fruits (Atkinson, 1983). Les racines poussent principalement au printemps et en automne, d'où la nécessité de bonnes réserves dans le sol en fin d'hiver et fin d'été (Leterme, 2012b). **Le développement de racines plus en profondeur peut être stimulé** par un travail du sol au plus près des troncs des jeunes arbres fruitiers (Kaeser et al., 2010), qui a pour effet de stresser leurs racines superficielles, et les inciter à faire des racines plus profondes ; également par l'enherbement au pied des arbres, qui génère de la compétition en surface (Schroth, 1998), ou par des stress hydriques : une plus grande proportion de racines longues est observée dans les milieux non irrigués, par rapport aux milieux irrigués (Atkinson, 1983).

Il n'a pas été trouvé de résultats expérimentaux de mesure des potentiels de développement racinaire des arbres fruitiers, tant latéralement qu'en profondeur, tout au long de leur vie. Toutefois, (Vercambre et al., 2003) ont élaboré un modèle 3D d'architecture racinaire sur la base de 4 années d'observations de pêcheurs greffés sur des pruniers. Ces observations ont été faites dans un verger expérimental du Sud-Est de la France, avec une profondeur de sol atteignable par les racines de plus de 3m, une irrigation minimale « de survie », une densité de plantation faible (70 arbres/ha, soit 140 m²/arbre ou un arbre par carré de 12m de côté), et avant la première mise à fruits.



(tiré de (Vercambre et al., 2003))

Figure 6: Simulation 3D du système racinaire d'un pêcher greffé sur prunier, à 2, 3 et 4 ans

Le modèle met en évidence les **potentiels d'expansion des racines** suivants (Figure 6) :

- Les racines descendent en profondeur, progressivement, d'environ 1m par an, tant que la résistance du sol le permet.
- Les racines s'étendent latéralement à toutes les profondeurs atteintes, avec une densité plus importante dans les 30 premiers centimètres ; cette extension est estimée en moyenne à 1m par an sur les 4 premières années dans les conditions de l'expérimentation (conditions non limitantes pour le développement des racines) ; elle ne serait pas limitée dans le temps, et pourrait se poursuivre à l'infini.

Croissance et fructification des arbres fruitiers

On distingue deux grandes phases dans la vie d'un arbre fruitier : la **phase de croissance** pure, avant la première mise à fruits, durant laquelle l'arbre est plus fragile et développe rapidement son système racinaire et sa structure aérienne ; la **phase de production**, durant laquelle l'arbre est moins fragile, croît moins rapidement, et produit des fruits. Selon le matériel végétal choisi, les premières mises à fruit peuvent avoir lieu dès la deuxième année après la plantation (Leterme, 2012b), mais plus classiquement à la «troisième feuille », c'est-à-dire la troisième année où l'arbre fait des feuilles après sa plantation.

Les choix faits au moment de la plantation impactent l'évolution des arbres sur le long terme (Plénet et al., 2010) ; en particulier, le choix d'espacement entre les arbres à la plantation doit être fait en fonction de la conduite choisie ; pour un éclaircissement optimal des fruitiers en parcelle arboricole pure, le rapport hauteur des arbres sur largeur des rangs ne doit pas excéder 1. Dans le cas des vergers maraîchers, les seuils minimaux d'espacement entre les arbres doivent être adaptés pour assurer le bon fonctionnement des cultures associées, ce qui devrait se traduire par des espacements moindres que ceux recommandés en arboriculture pure.

Les techniques de taille des fruitiers ont pour but de façonner l'architecture de l'arbre selon des choix d'exploitation du verger, tels que la mécanisation des travaux, la régularité de production, ou les objectifs de qualité des fruits et/ou de rendement (Plénet et al., 2010). Les **taillages d'hiver** sur les fruitiers ont lieu de décembre à mars (CA82, 2010), et consistent en un ébranchage visant à respecter la forme choisie pour l'arbre : axiale ou gobelet, basse ou haute tige. Les **éclaircissements** ont lieu en début d'été, généralement en plusieurs passages ; ils consistent en la suppression de fruits en gestation, afin de ralentir une production anticipée trop importante (Leterme, 2012b) par rapport aux potentiels des arbres et du milieu. L'éclaircissement a des impacts sur la taille des fruits restants, sur les rendements par arbre, et sur le prix de vente des fruits, lié à leur qualité (Hester, Cacho, 2003) ; l'éclaircissement est essentiel pour un bon retour à fruit l'année suivante, en évitant l'alternance (CA47, 2010).

Besoins en eau et minéraux

Dans leurs premières années, il faut permettre aux **jeunes arbres fruitiers** de bien s'établir, en leur fournissant les éléments nutritifs nécessaires, et en laissant la surface autour de leur tronc libre de végétation pour éviter la compétition (Kaeser et al., 2010). A ce titre, l'enherbement permanent au pied des arbres est plutôt déconseillé les 4 premières années (CA47, 2010). Ces recommandations vont à l'encontre des pratiques visant à la stimulation d'un développement racinaire en profondeur, qui requiert un minimum de compétition : les décisions de conduite près des arbres sont donc le résultat d'un compromis entre ne pas trop pénaliser la croissance aérienne des jeunes arbres et stimuler leur expansion racinaire.

Contrairement aux arbres de bois d'œuvre, qui ont la capacité de décaler leurs prises de nutriments si nécessaire, les arbres fruitiers sont plus sensibles aux compétitions lors de leurs **stades phénologiques critiques**, incontournables pour la production des fruits (Eichhorn et al., 2006). Ainsi, les besoins en éléments nutritifs des arbres fruitiers cultivés en France sont concentrés au printemps, au moment de l'induction florale, et après la récolte, au moment de la mise en réserves

Type de travail	Saisonnalité	Rendements		
		40 t/ha	60 t/ha	80 t/ha
Traitements phytosanitaires et fertilisation	Mi-mars à récolte	34	34	34
Taille	Décembre à fin mars	120	120	120
Eclaircissage	Juin	60	60	60
Récolte	Mi-août à début septembre	267	400	533
Pose et dépose des filets	Printemps et automne	45	45	45
Divers		20	20	20
TOTAL (h/ha)		546	679	812

(d'après (CA82, 2010))

Tableau 1 : Répartition des temps de travaux (h/ha) en vergers conventionnels - Pomme Gala

Type de travail	Saisonnalité	Rendements		
		6 t/ha	10 t/ha	14 t/ha
Traitements phytosanitaires et fertilisation	Mi-mars à récolte	17	17	17
Taille	Décembre à fin mars	100	100	100
Récolte et tri	Juin	500	833	1167
Divers		11	11	11
TOTAL (h/ha)		628	961	1295

(d'après (CA82, 2010))

Tableau 2 : Répartition des temps de travaux (h/ha) en vergers conventionnels - Cerise Summit

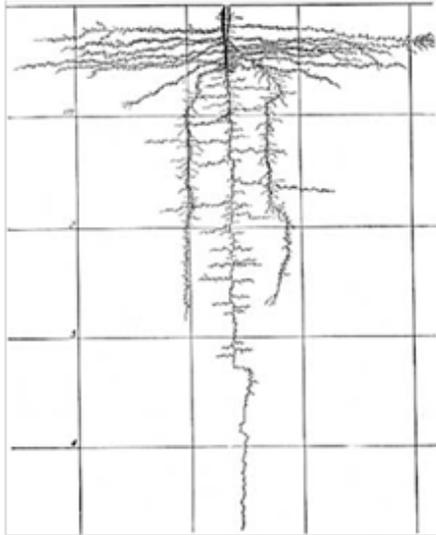
pour l'année suivante (Leterme, 2012a). Les risques de stress compétitif avec des cultures proches sont donc saisonniers, et fonction des nutriments communs avec ces cultures.

Pour ce qui concerne l'eau, une **irrigation** trop abondante pénalise le développement racinaire (asphyxie des racines) et peut provoquer une croissance végétative excessive au détriment de la production de fruits. De plus, un excès d'eau favorise les maladies des fruits qui ont grossi trop vite (Plénet et al., 2010). A l'opposé, des **déficits hydriques** importants pénalisent les développements aériens et racinaires des arbres, ainsi que les productions de fruits pour plusieurs années. Par contre, les déficits hydriques faibles ou modérés permettent une bonne efficacité d'utilisation de l'eau sans pénaliser les productions, avec même moins de fruits malades (Plénet et al., 2010). Les vergers actuels mettent en œuvre un pilotage de l'irrigation pour des apports en eau optimaux.

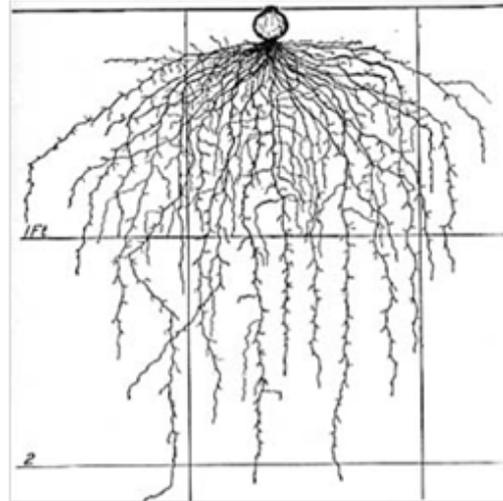
Organisation du travail

A la différence des arbres de bois d'œuvre, qui demandent surtout des interventions de taille dans les quinze premières années, les arbres fruitiers demandent la même charge de travail au fil du temps, pour leur entretien annuel et les récoltes (Kaeser et al., 2010). Les **travaux de récolte** sont cruciaux pour les revenus de l'exploitation : en fonction des circuits de distribution, il faut faire un compromis entre une bonne maturité des fruits récoltés et de bonnes conditions de conservation après récolte (Plénet et al., 2010).

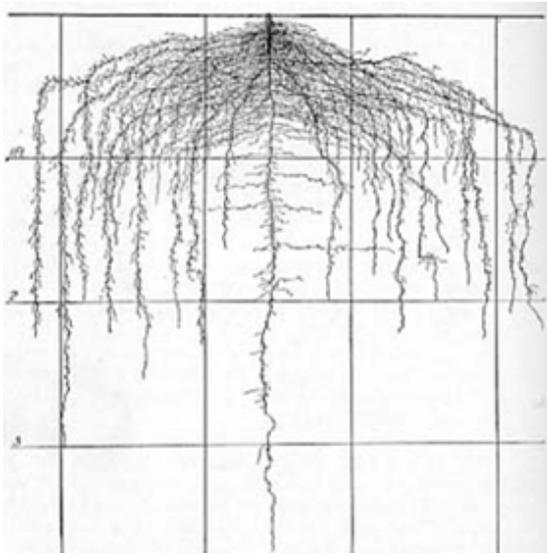
Comme le montrent les Tableau 1. pour le pommier, et Tableau 2 pour le cerisier, les temps de travaux et leur répartition sur l'année varient significativement d'une espèce fruitière à l'autre, et la part importante du travail est fournie au moment de la récolte. Les **dates de récolte** sont différentes selon les espèces, et sont aussi très fluctuantes selon les variétés choisies d'une même espèce : il faut en tenir compte dans la conception du verger, pour une bonne répartition des charges de récolte sur l'exploitation. Par exemple pour les pommes en Provence : les variétés Elstar ou Gala se récoltent en août, alors que les variétés Pink Lady ou Sundowner se récoltent en octobre-novembre (GRCETA Basse Durance, 2004).



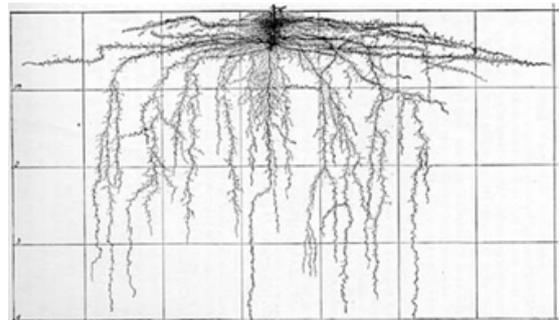
Carotte – 77j après semis



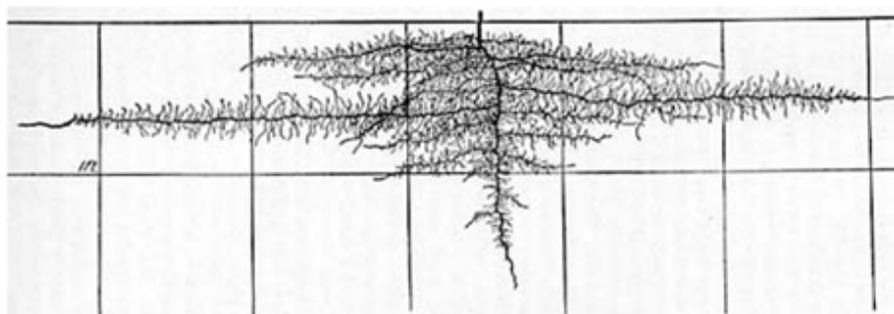
Oignon – 14s après semis



Laitue - 8 semaines après plantation



Tomate - 8 semaines après plantation



Melon Rocky Ford – 35j après semis

1 graduation = 1 pied (environ 30 cm)

(d'après (Weaver, Bruner, 1927))

Figure 7 : Systèmes racinaires d'espèces maraîchères

II.2.2.2 *Caractéristiques des cultures maraîchères*

Ce paragraphe détaille les caractéristiques des cultures maraîchères qui sont susceptibles d'entrer en jeu dans leur association avec des arbres sur une parcelle agroforestière. Les cultures maraîchères sont classifiées par espèce et variété, qui déterminent les éléments étudiés ci-après : système racinaire, saisonnalité, besoins en eau et minéraux, itinéraires techniques.

Systemes racinaires

Une étude rapportée dans (Portas, 1973) montre que le développement racinaire des légumes varie beaucoup d'une espèce à l'autre, et dépend des conditions pédoclimatiques : types de sol aux profondeurs atteignables par les racines, disponibilité de l'eau (précipitations ou irrigation). Les oignons se développent surtout dans les couches superficielles (0-20 cm), tout autour des plants, tandis que les choux, choux-fleurs et tomates pénètrent plus dans le sol, jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 50 cm pour les choux et 150 cm pour les tomates. Ces profondeurs de pénétration ne peuvent toutefois être atteintes que si le profil du sol le permet : dans les couches de sol à forte densité apparente (par exemple les semelles de labour tassées), seules certaines racines pénètrent, comme celles des choux, mais pas celles des melons ou tomates, qui restent bloquées et se développent alors plutôt latéralement qu'en profondeur. Le développement des racines en profondeur est par ailleurs favorisé par des conditions hydriques limitantes, tandis que l'irrigation excessive favorise le développement des racines superficielles.

Les **disparités de systèmes racinaires** entre espèces maraîchères (Figure 7) sont à prendre en compte dans leurs potentielles compétitions souterraines avec les arbres.

Saisonnalité des cultures maraîchères

Par rapport aux grandes cultures de céréales d'hiver, qui ont des cycles annuels, les cultures maraîchères ont des **temps de rotation courts** sur les parcelles, se réduisant à quelques mois, avec donc la possibilité de succession de plusieurs cycles sur la même parcelle au cours d'une même année. Dans le sud de la France, les cultures de plein champ sont possibles toute l'année, avec des espèces adaptées à chaque saison.

Dans la perspective de cultures maraîchères à proximité d'arbres, on peut distinguer deux périodes dans l'année :

- la période pendant laquelle les arbres ont des feuilles, **d'avril à septembre** : durant cette période, les arbres projettent de l'ombre à leur proximité ; il est préférable alors de cultiver sous les arbres des espèces maraîchères tolérantes à l'ombre, et/ou sensibles à la chaleur et à la sécheresse l'été ;
- le reste de l'année, **d'octobre à mars** : les cultures maraîchères adaptées à cette saison ne sont pas impactées par l'ombre des arbres ; leur occupation des parcelles permet alors une utilisation optimale de la surface disponible jusqu'au plus près des arbres (Eichhorn et al., 2006).

Besoins en eau et minéraux

Les cultures maraîchères ont des **besoins en eau qui varient selon les espèces et selon les stades culturaux** : un excès d'eau est tout aussi préjudiciable à la culture qu'un déficit. Il est même souvent préconisé de ne pas satisfaire à 100% les besoins des légumes, afin de stimuler leur croissance racinaire, et augmenter leur teneur en matière sèche (BLE, CIVAM Pays Basque, 2011).

Les besoins en éléments nutritifs sont eux aussi très variables d'une espèce de légume à l'autre, et sont liés aux rendements visés à l'hectare. Voir par exemple dans le Tableau 3 les besoins en azote de diverses cultures maraîchères : il y a une **grande disparité de besoins entre les espèces** peu demandeuses d'azote, comme la laitue, le melon ou les radis (moins de 100 kg N/ha), et les espèces très gourmandes comme les artichauts, les choux-fleurs ou les concombres (jusqu'à 500 kg N/ha) (CTIFL, 2012).

Espèces	Besoins (kg/ha N)	Potentiel de rendement (t/ ha) (t/ha sauf mention spécifique)
Artichaut Camus - 1 ^{ère} année (région Nord)	120	8
Artichaut Camus - 2 ^{ème} année (région Nord)	150	10-12
Artichaut Camus - 3 ^{ème} année (région Nord)	150-180	10-12
Artichaut (région Sud)	250 (140-400)	16 (10-25)
Asperge 1 ^{ère} pousse	108	Feuilles + tiges pour 20 000 plantes/ha
Asperge 2 ^{ème} pousse	124	Feuilles + tiges pour 20 000 plantes/ha
Asperge 3 ^{ème} pousse et suivantes	125	Feuilles + tiges pour 20 000 plantes/ha + 8-10 (turions)
Aubergine de plein champ	150-210	25-30
Aubergine sous abri en sol	220	120
Carotte cycle cultural d'été	130-165	60-80 (commercial)
Carotte cycle cultural de printemps	100-130	65-75 (commercial)
Carotte cycle cultural primeur	110	60 (commercial)
Chicorée géante maraîchère - Octobre	89	51
Chicorée fine maraîchère - Printemps	152	69
Chicorée fine maraîchère - Été-automne	122-124	72-73
Chicorée fine maraîchère – Printemps sous abri	94	55
Chicorée frisée - Été	130	54
Chicorée frisée - Automne	145	48
Chou fleur d'été	320-340	24000 plants/ha
Chou fleur d'automne	210-250	12000 à 14000 plants/ha
Chou fleur d'hiver	250-300	11000 à 12000 plants/ha
Concombre	330 - 500	210 - 300 kg/ha
Courgette sous abri	200-300	60-100
Endive	Sensible : 90-110 Tolérante : 125-155 Préférante : 150-185	35-40
Fraise de saison (Elsanta)	115	30,6 t fruits ou 6,5 t matière sèche
Fraise précoce (Gariguette)	180	30 t fruits ou 11 t matière sèche
Fraise remontante (Selva)	250	55 t fruits ou 17 t matière sèche
Laitue	80-90	400-450 g/plante
Mache	50-70	5 à 10
Melon sous abri	90-120	20-40
Melon plein champ irrigué	60-100	20-30
Poireau	160-255 selon créneau de production	50-80 selon créneau de production
Poivron sous abri en sol	180-300	60-110
Pomme de terre primeur	150-175	35-50
Radis	50-60	17
Tomate d'industrie	120-180	80-120
Tomate de plein champ	150	60
Tomate sous abri en sol, non chauffée	320	150
Tomate sous abri en sol chauffée	420	200
Oignon, ¹	120-150	70-90
Céleri Rave ²	160-260 (densité 30 000 à 50 000 /ha)	50-80

(tiré de (CTIFL, 2012))

Tableau 3 : Mobilisation en azote des cultures légumières

Organisation du travail

Les chambres d'agriculture publient des références régionales de temps de travaux type pour les cultures maraîchères. Ces temps de travaux, exprimés par hectare de monoculture, sont variables selon la taille des légumes, le degré d'envahissement des parcelles par les adventices, le degré de mécanisation, l'organisation du chantier (Argouarc'h, 2005), la dispersion des cultures sur l'exploitation. En se référant au Tableau 4, on remarque que les temps de travaux fluctuent beaucoup d'une culture à l'autre, et que **la part importante du travail est fournie au moment de la récolte.**

Nature de l'opération	carotte	pomme de terre	poireau	laitue abri	tomate
heures					
pépinière			179		
4 épandage MO / ferti	4	3	3	2	4
labour	3	2	4		3
travail sol	4	3		6	7
faux semis	9				
paillage				20	
semis ou plantation	3	30	50	260	640
aération et arrosage				90	
pose et dépose filet / P17	12	25			
binage thermique, mécanique, buttage	25,5	48	156		
désherbage manuel	280	24		30	40
protection sanitaire / traitements	1,5	11		0	41
entretien (taille, palissage, ...)					1085
AVANT RECOLTE	342	146	392	408	1820
broyage fanes		10			
récolte	700	140	525	430	1200
tri calibrage		70			
lavage/conditionnement	30	250	560	135	300
fin de culture	2	10	1	35	100
transport	15				
RÉCOLTE	747	480	1086	600	1600
TOTAL TEMPS DE TRAVAUX	1089 h	626 h	1478 h	1008 h	3420 h

(tiré de (CA Rhône-Alpes, 2009))

Tableau 4 : Répartition des temps de travaux par hectare de cultures maraîchères AB

III - Partie 2 : Preuve de concept de la modélisation sous forme de problème CSP pour l'aide à la conception de vergers maraîchers

III.1 - Objectifs de la preuve de concept

Par définition, une preuve de concept n'est pas un modèle complet utilisable tel quel, mais un sous-ensemble jugé représentatif de celui-ci. La preuve de concept, si elle s'avère convaincante, est une phase préliminaire au développement d'un modèle complet utilisable par les acteurs concernés.

La preuve de concept étudiée ici vise à démontrer la faisabilité de représenter des cultures de cycles différents évoluant en parallèle, et les diverses interactions spatio-temporelles pouvant potentiellement exister entre ces cultures, selon leurs âges et leurs positions respectives. Les deux questions majeures qui se posent au sujet de cette faisabilité sont d'une part la possibilité d'exprimer toutes les interactions souhaitées sous un formalisme de contraintes CSP ; d'autre part la possibilité de trouver des solutions au problème CSP dans des temps de calcul acceptables (quelques heures), avec le niveau de complexité minimal nécessaire (nombre de variables, nombre de contraintes) à une représentation satisfaisante.

Dans la mesure où le modèle de preuve de concept ne peut pas être exploitable tel quel dans des ateliers de co-conception, car non complet, il n'est pas rédhibitoire qu'il y manque des informations quantitatives détaillées sur certaines interactions entre espèces fruitières et maraîchères : ces données devront faire partie du travail de collecte d'informations complémentaires nécessaire pour la construction du modèle complet.

La suite de cette partie décrit les matériels et méthodes mis en œuvre pour construire le modèle de preuve de concept, puis analyse les divers résultats obtenus, pour enfin discuter la preuve de concept et les différentes options qui se présentent pour poursuivre les travaux de modélisation destinée à la conception de systèmes agroforestiers.

III.2 - Matériels et méthodes

III.2.1 - Constitution d'une base de connaissances pour la modélisation

La construction du modèle de preuve de concept commence par la définition des connaissances à représenter dans le modèle final : types d'interactions et règles de fonctionnement du système à intégrer dans le modèle, caractéristiques des espèces cultivées (fruitières et maraîchères) qui entrent en jeu dans ces interactions et règles.

Les types d'interactions et règles de fonctionnement applicables aux vergers maraîchers sont définis sur la base des informations recueillies lors du travail de synthèse bibliographique, complétées par des interviews d'experts de l'INRA (principalement dans les unités Ecodéveloppement et PSH) et du GRAB, ainsi que des informations relayées dans les résultats antérieurs de groupes de travail des projets Durette et TAB multi-espèces. Les interactions et règles sélectionnées pour le modèle de preuve de concept sont décrites dans le document de construction du modèle (voir annexe 2).

Les caractéristiques des espèces sont principalement collectées dans des documents d'instituts techniques (GRAB, ITAB, CTIFL) et de chambres d'agriculture, et sont organisées sous forme de « fiches espèce ». Pour chaque espèce sélectionnée pour le modèle de preuve de concept, une fiche espèce est créée, rassemblant toutes ses caractéristiques nécessaires à la modélisation (voir des exemples en annexe 1).

III.2.1.1 Types d'interactions

Les types d'interactions à représenter dans le modèle de verger maraîcher sont les interactions classiquement observées dans les systèmes agroforestiers, conformément à ce qui a été relevé dans la synthèse bibliographique :

- Partage de l'eau.
- Compétition pour l'eau.

- Partage des éléments nutritifs.
- Compétition pour les éléments nutritifs.
- Pertes de lumière sous les arbres.
- Microclimat sous les arbres.
- Régulations naturelles entre espèces.

III.2.1.2 Règles de fonctionnement du système

Aux interactions agroforestières précédentes s'ajoutent des règles liées à l'organisation du verger maraîcher, qui sont nécessaires dans le modèle pour aboutir à des solutions réalistes :

- Regroupement des cultures maraîchères sur l'exploitation : pour éviter une trop grande dispersion des cultures, qui entraîneraient des allongements importants des temps de travaux.
- Répartition des temps de travaux au cours de l'année.
- Etalement et mixité des diverses productions au cours de l'année.

Enfin, un minimum de règles de fonctionnement propres aux vergers et aux cultures maraîchères pris séparément est aussi nécessaire à la représentation correcte du système :

- Espacement minimal entre les arbres.
- Evolution des arbres au cours du temps : morphologie, physiologie, production, travaux.
- Saisonnalité des cultures maraîchères : chaque espèce est associée à un calendrier cultural.
- Délais de retour et effets précédent des cultures maraîchères.

III.2.1.3 Caractéristiques des espèces cultivées entrant en jeu

Pour définir les interactions et règles de fonctionnement du système dans le modèle, les caractéristiques suivantes des espèces horticoles doivent être connues, ou à défaut estimées :

- Compartiments racinaires occupés.
- Besoins en eau.
- Sensibilité aux stress hydriques.
- Besoins en éléments nutritifs.
- Sensibilité aux manques de certains éléments nutritifs.
- Principaux bioagresseurs et périodes à risque.
- Régulations naturelles : effets connus sur les bioagresseurs d'autres espèces.
- Calendriers culturaux.
- Temps de travaux par mois.
- Pour les espèces fruitières :
 - o Morphologie.
 - o Rayonnement solaire intercepté.
- Pour les espèces maraîchères :
 - o Sensibilité à la perte de rayonnement solaire et au microclimat sous les arbres.
 - o Délais de retour et effets précédents.

III.2.2 - Modélisation au formalisme CSP

III.2.2.1 Définition d'un modèle CSP

Un modèle CSP est caractérisé par :

- Un jeu de **variables**, qui représentent les éléments du domaine étudié que l'on souhaite déterminer grâce à la modélisation ; par exemple : un type de culture alloué sur une parcelle donnée pour une période ;
- Un **domaine** de valeurs possibles pour chacune des variables ci-dessus ; par exemple, les types de culture possibles seraient : prairie temporaire, blé, colza, betterave.
- Des relations entre les variables, qui sont les **contraintes** du modèle ; par exemple : « la surface totale de blé sur toutes les parcelles de l'exploitation n'excède pas 25 hectares », ou « il n'est pas possible d'avoir du blé sur la même parcelle 2 années de suite ».

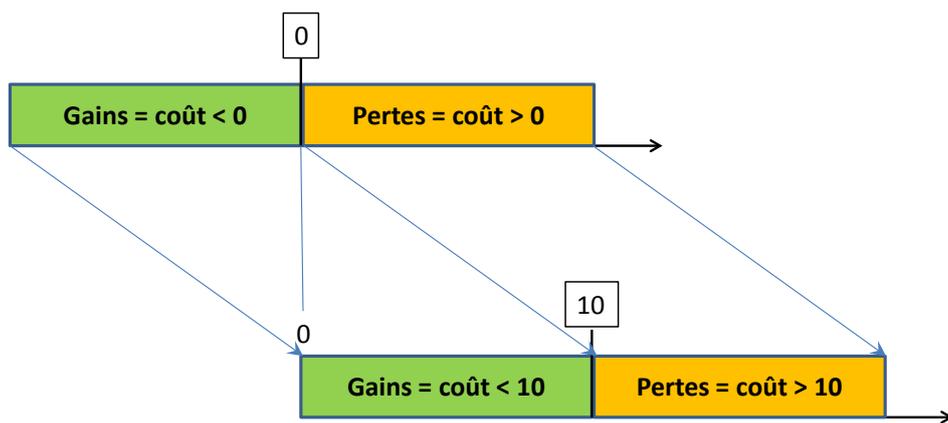


Figure 8 : Décalage d'origine des coûts pour représenter des gains

Le résultat de la modélisation CSP est l'ensemble des instanciations du jeu de variables qui respectent les domaines de valeurs possibles de ces variables, et qui satisfont toutes les contraintes. Pour être plus précis, une instanciation du jeu de variable est l'affectation d'une valeur à chaque variable du jeu, et constitue une solution au problème.

III.2.2.2 Outil de résolution

L'outil à disposition pour la modélisation de type CSP durant ce stage est le solveur *toulbar2* développé par le département de Mathématique et Informatique appliquées de l'INRA de Toulouse. Cet outil permet de trouver les solutions à des problèmes de satisfaction de contraintes pondérées (WCSP pour Weighted Constraint Satisfaction Problems). L'avantage des contraintes pondérées, par rapport aux contraintes strictes, est de pouvoir modéliser des contraintes floues, qui ne doivent pas être strictement respectées, mais sont associées à des coûts selon leur degré de violation. Ce type de contraintes permet d'exprimer des préférences, comme cela a été fait dans (Akplogan et al., 2013) pour résoudre un problème d'allocation de grandes cultures.

Le solveur *toulbar2* exploite en entrée un fichier texte au format WCSP, détaillé dans (INRA, 2012). Ce fichier décrit les variables, domaines et contraintes du problème à résoudre. Les contraintes sont exprimées sous forme de fonctions de coût entre des combinaisons de valeurs de variables.

Les sorties du solveur *toulbar2* sont des combinaisons d'affectation de valeurs à toutes les variables du modèle, qui respectent les contraintes strictes, et minimisent les coûts des contraintes floues.

III.2.2.3 Particularités des fonctions de coût

En modélisation WCSP, les coûts associés aux valeurs des variables sont des valeurs entières positives.

Il en résulte d'abord que pour exprimer à la fois des gains et des pertes dans une fonction de coût, il est nécessaire d'utiliser le coût 0 comme valeur de gain maximal, et des coûts positifs croissants pour des gains plus petits, puis des situations neutres, puis des pertes (Figure 8). Par exemple, pour une fonction de coût représentant 3 situations (gain, neutre, perte), le gain est associé à un coût 0, le neutre à un coût 10, et la perte à un coût 20.

Par ailleurs, puisque seules les valeurs entières sont possibles pour les coûts, il est préférable, lors de la construction initiale d'un modèle, de définir des coûts de valeurs entières non consécutives, de sorte qu'il soit possible par la suite d'intercaler des coûts intermédiaires si besoin. Par exemple, si les coûts de la fonction sont 0, 1, 2, 3, il n'est pas possible d'ajouter un coût intermédiaire entre 1 et 2, car la valeur 1,5 n'est pas autorisée. Pour cette raison, il a été choisi d'utiliser des coûts multiples de 10 lors de la construction du modèle de preuve de concept étudié ici.

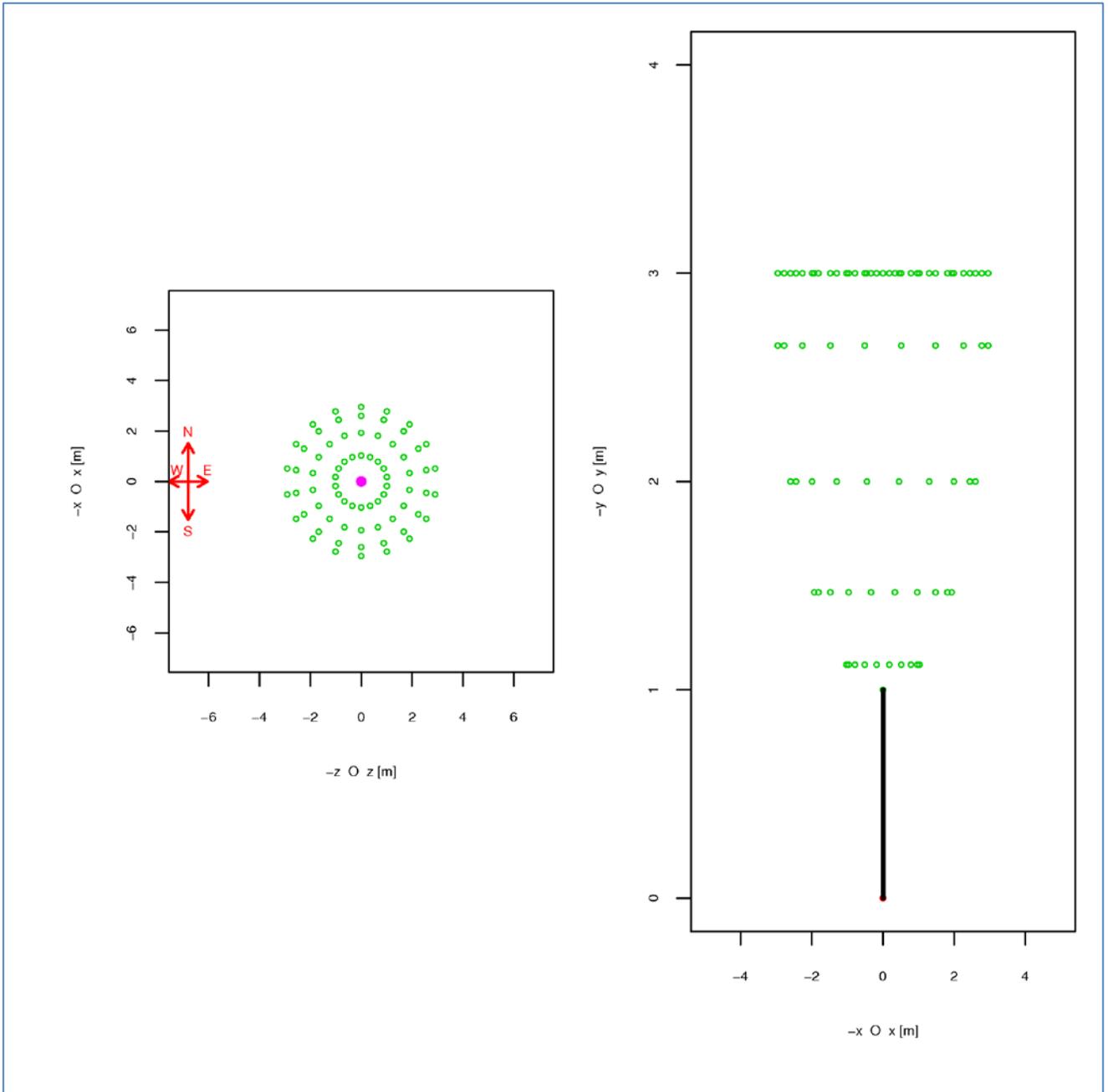
III.2.3 - Délimitation du modèle de preuve de concept

Par rapport au modèle complet de verger maraîcher, le modèle de preuve de concept est simplifié en termes de nombre d'entités différentes représentées, mais pas en termes de variabilité des éléments à représenter.

III.2.3.1 Choix des espèces maraîchères

Ainsi, toutes les espèces maraîchères possibles ne sont pas incluses dans la preuve de concept, mais seulement une sélection d'espèces représentative de la variabilité des caractéristiques entrant en jeu dans le modèle :

- Système racinaire superficiel ou profond, qui détermine les compartiments de sol où sont prélevées les ressources, et où ont potentiellement lieu les interactions souterraines avec les arbres.
- Sensibilité à l'ombre, positive ou négative, qui détermine les bénéfices ou préjudices de positionner la culture dans une zone d'ombrage des arbres.
- Saison et durée de cycle de culture, qui déterminent la période de l'année pendant laquelle une culture peut être présente, à l'exclusion des autres périodes.



(Source : outil de simulation INRA PSH)

Figure 9 : Morphologie d'un arbre fruitier modélisé à maturité

La morphologie générique choisie pour la modélisation de l'arbre fruitier à maturité est une hauteur totale de 3m, avec un houppier de 2m, et un rayon uniforme de 3m : les points verts schématisent l'enveloppe foliaire de l'arbre, à gauche vue de dessus, et à droite vue de profil.

Les espèces sélectionnées sont les suivantes :

- Salades de printemps, d'été et d'automne : saisons différentes, cycle court sur une saison, système racinaire moyennement profond, peu de sensibilité à l'ombre, voire même bénéfique à l'ombre l'été.
- Tomate : cycle long printemps-été, système racinaire profond, sensibilité à l'ombre au printemps, mais bénéfique à l'ombre l'été.
- Melon : cycle court été, système racinaire superficiel, grande sensibilité à l'ombre.
- Carotte : cycle long été-automne, système racinaire profond, peu de sensibilité à l'ombre.
- Oignon : cycle long printemps-été, système racinaire superficiel, grande sensibilité à l'ombre au printemps.

A ces espèces maraîchères proprement dites sont ajoutés deux types d'engrais verts, de cycles court (automne) ou moyen (automne-hiver), à intercaler avec les cultures maraîchères, comme recommandé pour entretenir le sol en maraîchage biologique (ITAB, 2005).

III.2.3.2 Choix des espèces fruitières

Dans le modèle de preuve de concept, il est choisi de ne pas différencier les espèces fruitières, et donc d'utiliser une notion d'« arbre fruitier » générique. La raison en est que, par rapport aux interactions et règles de fonctionnement choisies (voir ci-après), la distinction des caractéristiques d'espèces d'arbres n'apporterait pas de diversité de représentation au formalisme CSP, mais seulement une multiplication des variables et contraintes, sans réelle démonstration de nouveau concept dans le modèle. La morphologie générique choisie pour la modélisation de l'arbre fruitier est schématisée sur la Figure 9.

III.2.3.3 Choix des types d'interactions représentés

La sélection des types d'interactions se fait sur la variabilité des représentations au formalisme CSP : influence positive et/ou négative de l'interaction, périmètre d'occurrence autour des arbres. Il en résulte un choix de 3 types d'interactions à inclure dans le modèle de preuve de concept :

- Perte de lumière sous les arbres : interaction positive ou négative selon les espèces maraîchères, sur périmètre restreint et non symétrique autour de l'arbre ; représentation qui serait similaire pour le microclimat sous les arbres.
- Partage de l'eau : interaction positive sur périmètre de grand rayon autour de l'arbre ; représentation qui serait similaire pour le partage des éléments nutritifs, et pour les régulations naturelles entre espèces.
- Compétition pour l'eau : interaction négative sur périmètre de grand rayon autour de l'arbre ; représentation qui serait similaire pour la compétition pour les éléments nutritifs.

III.2.3.4 Choix des règles de fonctionnement représentées

Toutes les règles de fonctionnement du système sont représentées dans le modèle de preuve de concept, à l'exception des délais de retour et effets précédents des cultures maraîchères, qui ne peuvent pas être correctement modélisés à cause du trop petit nombre d'espèces sélectionnées. En effet, les délais de retour préconisés pour les espèces maraîchères sont de plusieurs années (5 ou 6 ans) : pour une modélisation correcte, il faudrait donc disposer d'un minimum de 5 ou 6 espèces maraîchères par saison, pour être capable de construire des rotations respectant les délais de retour, alors que seules 6 espèces sont sélectionnées pour la preuve de concept, toutes saisons confondues. Ce choix n'affaiblit toutefois pas la preuve qui sera apportée car les délais de retour et les effets précédents ont déjà été représentés avec succès avec des modèles CSP (Akplogan et al., 2013).

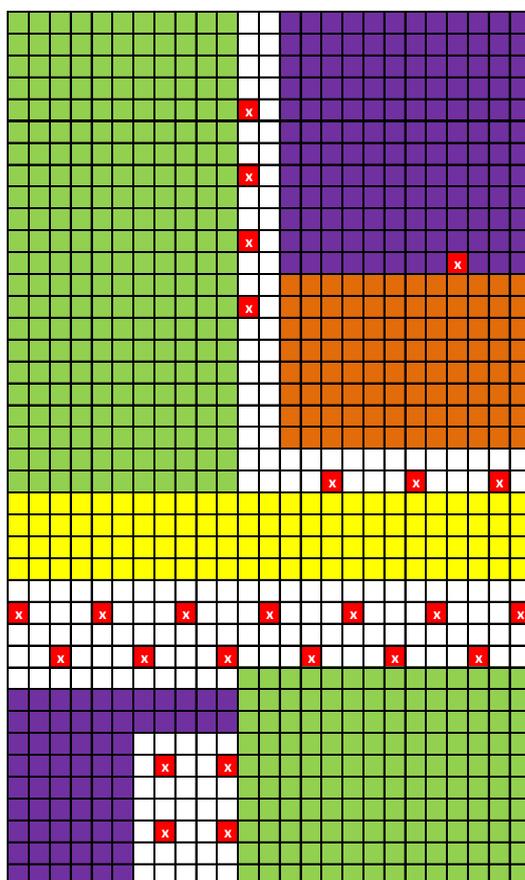


Figure 10 : Représentation spatiale détaillée d'une parcelle de verger maraîcher

Les unités rouges avec une croix au centre représentent des arbres fruitiers, les unités blanches des sols nus, et les unités d'autres couleurs des surfaces de maraîchage, avec une couleur différente par culture.

III.3 - Résultats

III.3.1 - Choix de représentation des connaissances

III.3.1.1 Représentation spatio-temporelle du verger maraîcher

a) Représentation précise de la réalité

Intuitivement, le verger maraîcher est représenté spatialement par une parcelle découpée en unités spatiales, toutes de même taille, ne portant chacune qu'au maximum une espèce cultivée, parmi : un arbre fruitier, une culture maraîchère, un engrais vert. Lorsque l'unité spatiale ne porte aucune espèce cultivée, on parle de « sol nu ». Une surface de parcelle de 1000 m² découpée en 1000 unités spatiales de 1 m² permet aux concepteurs de facilement se projeter dans le verger maraîcher, comme schématisé sur la Figure 10. Cette surface est certes petite pour un verger maraîcher en production, mais elle permet de représenter un motif de taille suffisamment grande, à répéter le cas échéant à l'identique sur toute la surface visée.

Afin de bien représenter les cycles culturaux des cultures maraîchères, ainsi que les variations des temps de travaux et des productions au cours de l'année, la granularité du pas de temps de modélisation devrait être au moins mensuelle.

En outre, l'horizon minimal de modélisation doit couvrir la phase de croissance des arbres, et au moins une année de maturité de ces derniers. Au-delà de cette année de maturité, les caractéristiques des arbres sont stables, et la modélisation ne concerne plus alors que la proposition de rotations maraîchères avec des arbres à maturité, ce qui n'est pas l'essentiel visé par la preuve de concept pour les vergers maraîchers. La pleine production de fruits étant atteinte à la 7^{ème} ou 8^{ème} feuille des arbres, l'horizon minimal de modélisation est 9 ans.

Cette représentation précise de la réalité spatio-temporelle du verger maraîcher se traduit par un modèle à 1000 variables spatiales x 108 pas de temps (12 mois x 9 ans), soit 108000 variables.

b) Réduction de complexité de la représentation

Le nombre de variables de la représentation ci-dessus est environ 100 fois plus grand que le nombre de variables des problèmes CSP résolus à ce jour en des temps de calcul acceptables avec le solveur *toulbar2* que l'on souhaite utiliser ici. Il est donc nécessaire de réduire le nombre de variables du problème posé, pour pouvoir le résoudre avec le solveur *toulbar2*, qui est l'outil à disposition pour la preuve de concept. Si celle-ci est convaincante sur un nombre de variables réduit, il sera alors éventuellement envisageable de faire évoluer l'outil pour supporter un plus grand nombre de variables. Quatre propositions sont étudiées pour cette réduction :

1. Réduction des variables de la dimension spatiale, en travaillant uniquement sur des lignes de culture, plutôt que sur des unités spatiales. Cette proposition laisse très peu de place à l'innovation dans les agencements qui seront offerts comme solutions, conformes aux idées déjà répandues sur la structuration des associations de cultures en lignes.
2. Réduction des variables de dimensions spatiales et temporelles en travaillant sur des rotations maraîchères génériques, ne faisant donc plus partie des solutions au problème, seul restant le calcul du positionnement optimal des arbres sur la parcelle. Cette proposition ne permet pas de faire évoluer correctement le choix des cultures maraîchères en fonction de la maturité des arbres, et de l'évolution de leurs impacts au cours du temps.
3. Résolution du problème en 2 phases : une phase exploratoire qui détermine toutes les combinaisons possibles de positionnement des arbres sur la parcelle, suivie d'une phase de résolution de type CSP sur chacune des combinaisons précédentes, afin de trouver quel positionnement d'arbres permet d'aboutir au coût optimal. Il n'est pas prouvé que la combinatoire de la première phase ne soit pas trop importante pour résoudre le problème en des temps de calcul acceptables.

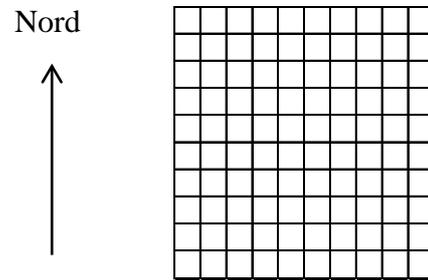


Figure 11 : Représentation spatiale d'une parcelle dans le modèle de preuve de concept

Cultures	Printemps	Été	Automne	Hiver
Salade	SAP	SAE	SAA	
Tomate	TO1	TO2		
Oignon	OI1	OI2		
Melon		ME		
Carotte		CA1	CA2	
Engrais vert			EV1	EV2
Sol nu	SN	SN	SN	SN
Arbres	ARF	ARF	ARF	ARF

Tableau 5 : Saisonnalité des cultures maraîchères

4. Réduction des variables de toutes les dimensions en gardant l'exhaustivité de représentation initiale : découpage de la parcelle en 100 unités spatiales au lieu de 1000, de surface non quantifiée précisément (plus grande que le m²), découpage de l'année en 4 saisons plutôt que 12 mois, évolution des caractéristiques des arbres selon 3 phases, au lieu d'une évolution détaillée annuelle.

c) Représentation choisie

La quatrième proposition est retenue pour la preuve de concept car elle est la seule à ne pas restreindre la complexité des interactions représentées, et permet d'intégrer tous les aspects agronomiques initialement souhaités dans le modèle pour répondre aux questions d'agencements de vergers maraîcher : positionnement « libre » des arbres, évolution temporelle des arbres, évolution du positionnement des cultures maraîchères en fonction de la maturité des arbres.

Cette représentation réduite sur toutes les dimensions aboutit à un problème à 1200 variables (100 unités spatiales x 12 pas de temps), de taille acceptable. A chaque pas de temps, la parcelle modélisée est représentée par un carré de 10x10 unités spatiales de taille identique, comme le montre la Figure 11.

III.3.1.2 Variables et domaines

Une variable du modèle est une unité spatiale à un pas de temps de modélisation, c'est-à-dire à une saison de l'une des 3 phases d'évolution des arbres représentées.

Le domaine d'une variable est l'ensemble des occupations de sol possibles sur l'unité spatiale représentée ; cet ensemble dépend de la saison à laquelle appartient la variable (Tableau 5).

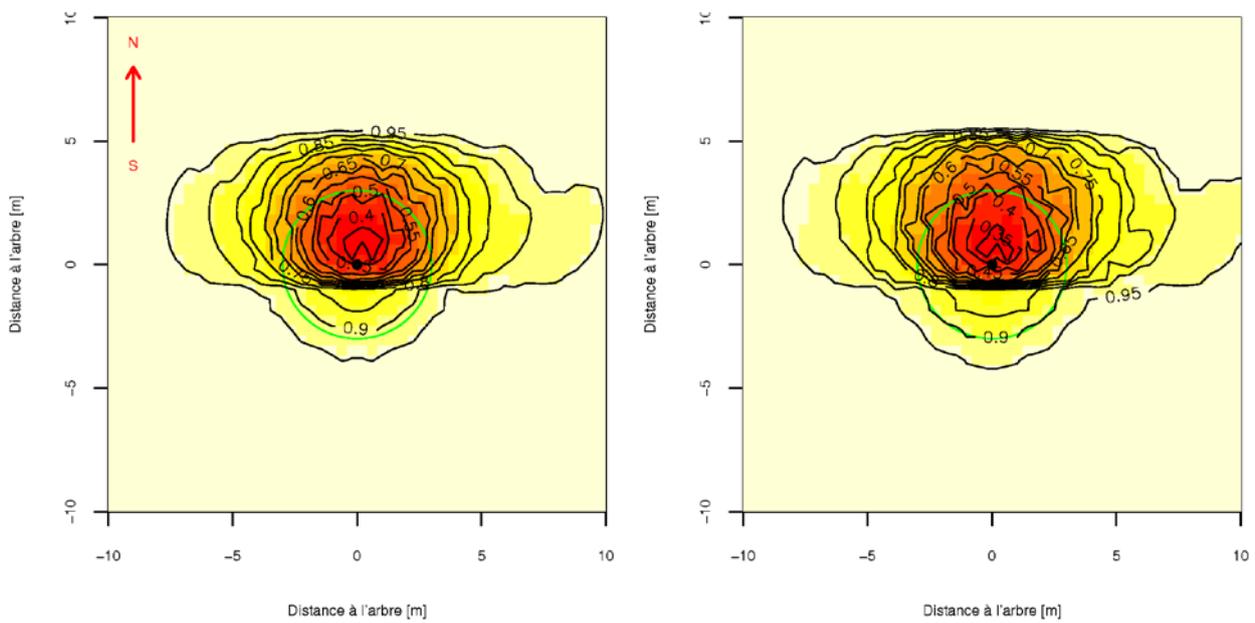
Les valeurs de variables suivantes sont communes à toutes les saisons :

- SN = sol nu
- ARF = arbre fruitier

A ces valeurs s'ajoutent des valeurs spécifiques à chaque saison :

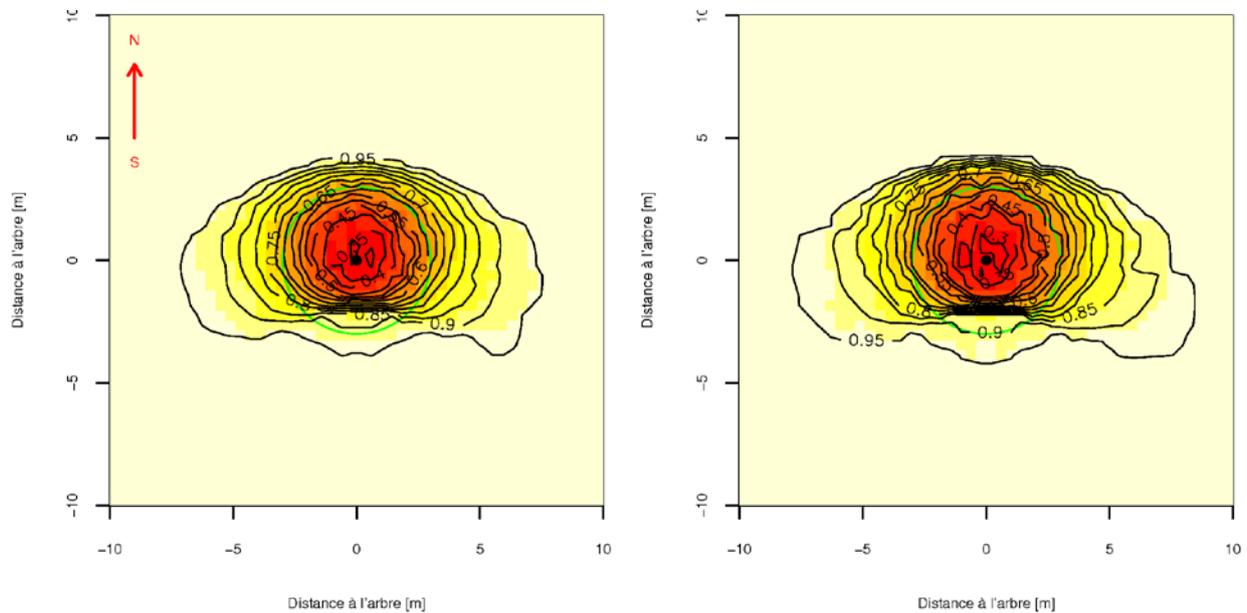
- Printemps :
 - o SAP = salade de printemps
 - o TO1 = tomate – stade 1
 - o OI1 = oignon – stade 1
- Été :
 - o SAE = salade d'été
 - o TO2 = tomate stade 2
 - o ME = melon
 - o CA1 = carotte – stade 1
 - o OI2 = oignon – stade 2
- Automne :
 - o EC = engrais vert court
 - o EV1 = engrais vert intermédiaire - stade 1
 - o SAA = salade d'automne
 - o CA2 = carotte – stade 2
- Hiver :
 - o EV2 = engrais vert intermédiaire - stade 2

Le domaine d'une variable à une saison donnée comporte donc au maximum 7 valeurs possibles, en été.



(Source : outil de simulation INRA PSH)

Figure 12 : Interception de rayonnement solaire - Jour 90



(Source : outil de simulation INRA PSH)

Figure 13 : Interception de rayonnement solaire - Jour 160

Résultats de simulation d'interception de rayonnement solaire par les arbres, avec à gauche une densité foliaire de 2,5 et à droite une densité foliaire de 10, pour un arbre de morphologie décrite au paragraphe III.2.3.2. Les différentes couleurs représentent les niveaux de rayonnement solaire restant disponible autour de l'arbre selon la distance au tronc : plus la couleur est foncée, plus le rayonnement intercepté est important.

III.3.1.3 Exemple de traduction d'une interaction au formalisme CSP : perte de lumière sous les arbres

a) Description agronomique de l'interaction

Quand les arbres fruitiers sont en feuilles, d'avril à septembre, ils interceptent une partie du rayonnement solaire disponible pour les cultures installées à leur proximité. Le degré d'interception du rayonnement, et le périmètre de sol impacté autour de l'arbre, sont fonction de la morphologie de l'arbre (hauteur, largeur de houppier, densité de houppier), elle-même fonction de l'âge de l'arbre et de son espèce, et du jour de l'année, qui détermine l'élévation du soleil et l'inclinaison de ses rayons.

Les espèces maraîchères ont des sensibilités à la perte de rayonnement solaire direct, qui peuvent se traduire par des impacts sur les rendements, positifs ou négatifs selon les espèces. La sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire disponible varie aussi en fonction de la saison, qui détermine une plage de durée quotidienne d'ensoleillement : l'impact d'un moindre rayonnement sur les cultures est moins important quand les jours sont plus longs.

b) Modélisation des caractéristiques des espèces entrant en jeu

Rayonnement solaire intercepté par les arbres

Un outil de simulation du rayonnement solaire intercepté par les arbres, développé par l'unité PSH (Plantes et Systèmes de culture Horticoles) de l'INRA d'Avignon, est utilisé pour déterminer les périmètres d'interception de rayonnement autour d'un arbre selon la saison, la morphologie de l'arbre, et sa densité foliaire. Les Figure 12 et Figure 13 présentent les résultats de ces simulations pour respectivement les jours 90 (31 mars) et 160 (9 juin).

Dans le contexte de simulation choisi, il y a peu de différences d'interception entre les jours 90 et 160, et entre les densités foliaires 2,5 et 10 : une seule configuration de l'interception de la lumière par les arbres est donc modélisée pour toutes les saisons où il y a présence de feuilles sur les arbres, et pour toutes densités foliaires. Cette configuration est une transposition des résultats de simulation ci-avant à des zones autour des arbres, modélisées par des unités spatiales adjacentes à une unité spatiale portant un arbre, comme schématisé sur la Figure 14. Sur cette figure, les couleurs correspondent à 3 niveaux d'interception du rayonnement solaire :

- Interception supérieure à 50%.
- Interception entre 20 et 50%.
- Interception inférieure à 20%.

A ceci s'ajoutent des hypothèses sur les arbres pour la modélisation :

- Les arbres interceptent la lumière seulement aux saisons printemps et été.
- Ils ont la morphologie d'un arbre à maturité décrite au paragraphe III.2.3.2 pour les phases 2 et 3 de modélisation.
- En phase 1 de modélisation, ils n'interceptent pas de rayonnement solaire en dehors de leur unité spatiale.

Sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire

Sur la base de recherches bibliographiques relatives aux cultures à l'ombre, d'informations collectées dans les documents des instituts techniques ayant servi à la rédaction des « fiches-espèces » (voir annexe 1), et d'interviews d'experts en maraîchage, la sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire est modélisée qualitativement comme suit :

- Si la perte de rayonnement est supérieure à 50%, il n'y a pas de culture maraîchère possible.
- Si la perte de rayonnement est inférieure à 20%, il n'y a pas d'incidence sur les cultures maraîchères.



Figure 14 : Configuration de modélisation de l'interception de rayonnement par les arbres

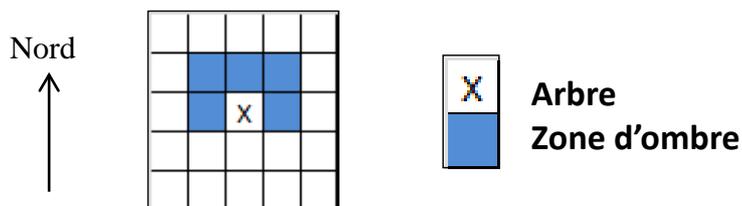


Figure 15 : Unités spatiales affectées par la perte de rayonnement solaire

Espèce	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Salade Printemps				(0)	(0)	(+)						
Salade Eté							(+)	(+)	(0)			
Salade Automne									(0)	(-)	(-)	(-)
Tomate					(-)	(0)	(+)	(+)	(0)			
Melon						(-)	(-)	(-)	(-)			
Carotte						(0)	(0)	(0)	(0)	(-)	(-)	(-)
Oignon				(-)	(-)	(0)	(0)	(0)	(0)			
EV court								(0)	(0)	(0)		
EV intermédiaire	(0)	(0)							(0)	(0)	(0)	(0)

Tableau 6 : Sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire
 Evaluation qualitative de la sensibilité : neutre (0), perte (-) ou gain (+) de rendement.

Espèce	Printemps	Eté
Salade Printemps	10	N/A
Salade Eté	N/A	0
Salade Automne	N/A	N/A
Tomate	10	0
Melon	N/A	20
Carotte	N/A	10
Oignon	20	10
EV court	N/A	N/A
EV intermédiaire	N/A	N/A

(N/A = non applicable)

Tableau 7 : Fonction de coût pour les espèces maraîchères à l'ombre

- Si la perte de rayonnement est comprise entre 20 et 50%, l'impact sur les cultures maraîchères est défini qualitativement (Tableau 6) : neutre (0), perte (-) ou gain (+) de rendement, en fonction de l'espèce et des mois pendant lesquels elle est cultivée.

c) Formalisme CSP

En combinant le zonage des pertes de rayonnement solaire sous les arbres de la Figure 14, et les niveaux de sensibilité des espèces maraîchères à la perte de rayonnement, et sachant qu'une unité spatiale portant un arbre ne peut pas porter de culture maraîchère, les unités spatiales pouvant potentiellement porter des cultures et être affectées par la perte de rayonnement sont représentées sur la Figure 15. Dans le modèle CSP, des variables intermédiaires booléennes, « ombre ou soleil », sont calculées pour repérer toutes les unités spatiales qui sont impactées par l'ombre autour des arbres (unités en bleu sur la Figure 15).

Afin de trouver des solutions tirant au mieux parti des avantages de l'ombre, tout en limitant ses inconvénients, une fonction de coût est utilisée, associant une unité spatiale portant une espèce maraîchère, et sa variable intermédiaire « ombre ou soleil ». En cas de positionnement à l'ombre, cette fonction a un coût nul pour les cas les plus favorables (influence positive), un coût égal à 10 pour les cas de non-influence, et un coût de 20 pour les cas les moins favorables (influence négative). La fonction de coût décrite dans le Tableau 7 est déduite du Tableau 6, pour les saisons printemps et été, seules saisons auxquelles des feuilles sont présentes sur les arbres. Pour amplifier le bénéfice de l'ombre en été sur certaines espèces (tomate, salade), une fonction de coût est ajoutée, pénalisant d'un coût de 10 le positionnement de ces espèces au soleil l'été.

Les descriptions et traductions de toutes les interactions du modèle de preuve de concept sont détaillées en annexe 2.

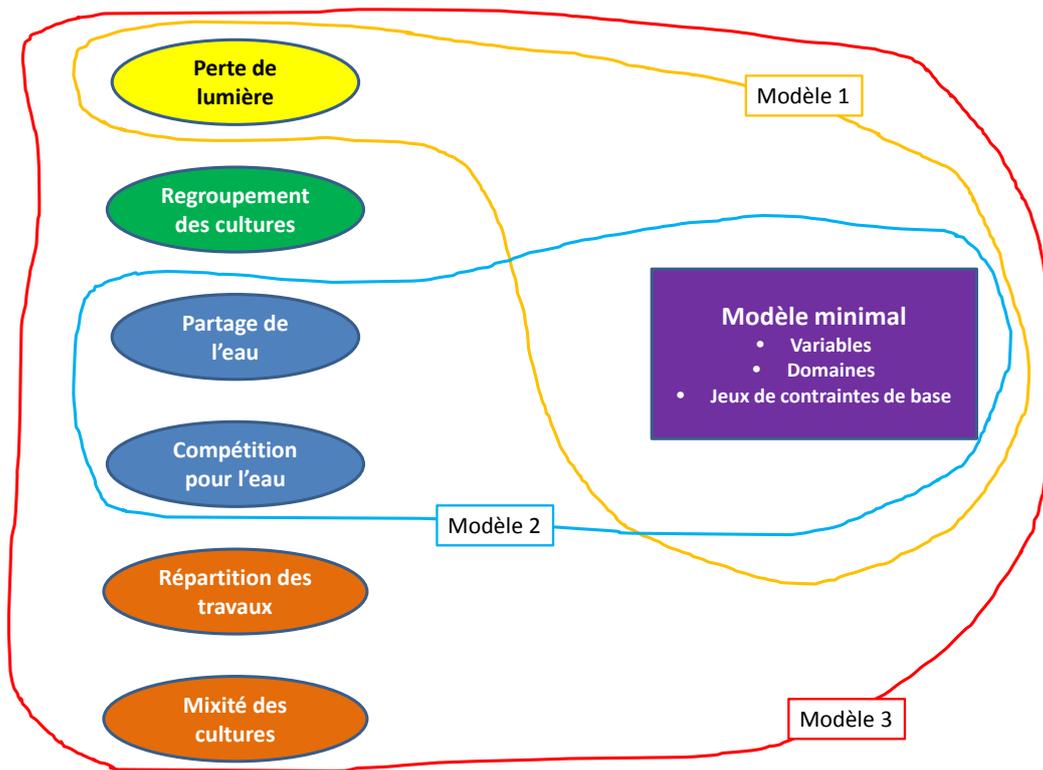


Figure 16 : Un modèle CSP modulaire

En partant du même modèle de base minimal, 3 modèles différents sont construits en combinant des jeux de contraintes différents : le modèle 1 cherche des solutions minimisant les impacts de perte de lumière sous les arbres ; le modèle 2 cherche des solutions optimisant compétition et partage de l'eau ; le modèle 3 est le modèle complet de preuve de concept, optimisant la combinaison de toutes les interactions prises en compte.

III.3.2 - Un modèle modulaire et évolutif

III.3.2.1 Un modèle modulaire

Comme évoqué au paragraphe III.2.2 -, le code du modèle WCSP se présente sous forme d'un fichier texte décrivant les contraintes en séquence, chacune étant exprimée indépendamment des autres : il est donc aisé de construire des modèles différents à partir de jeux de contraintes modélisées dans des fichiers différents, en combinant tout ou seulement un sous-ensemble de ces fichiers.

Pour construire un modèle de verger maraîcher, un sous-ensemble minimal de jeux de contraintes doit être inclus, afin d'assurer un fonctionnement réaliste du système :

- Espacement minimal entre les arbres.
- Evolution des arbres au cours du temps.
- Saisonnalité des cultures maraîchères.

A ce sous-ensemble minimal peuvent être ajoutées des combinaisons de jeux de contraintes supplémentaires, selon les critères à intégrer dans les propositions de solutions :

- Perte de lumière sous les arbres.
- Partage de l'eau.
- Compétition pour l'eau.
- Regroupement des cultures maraîchères.
- Répartition des temps de travaux au cours de l'année.
- Etalement et mixité des diverses productions au cours de l'année.

Selon les combinaisons de jeux de contraintes choisis, les propositions de solutions diffèrent, ainsi que leur coût optimal et les temps de calcul du solveur. La Figure 16 illustre cette modularité.

III.3.2.2 Un modèle évolutif

Les jeux de contraintes listés ci-dessus font partie de la preuve de concept. Pour faire évoluer le modèle et l'enrichir d'une interaction, par exemple le partage de l'azote, il suffit de développer le jeu de contraintes associé dans un fichier WCSP, et de l'utiliser dans des combinaisons avec les jeux de contraintes précédents, sans nécessité de retoucher ces derniers.

Type unité spatiale	Ombre Racines (OR)				Soleil Racines (SR)				Soleil Pas de racines (S)			
	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total
Sol nu	0	0	10	10	0	0	10	10	0	0	0	0
Salade Printemps	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10	10
Salade Eté	0	10	0	10	20	10	0	30	20	0	0	20
Salade Automne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Tomate	10	30	0	40	10	30	0	40	10	0	10	20
Melon	20	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	10	20	0	30	0	20	0	20	0	0	10	10
Oignon	30	0	0	30	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert intermédiaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20

Tableau 8: Fonctions de coût des interactions modélisées – Coûts équilibrés

Les colonnes « Posit », « Compét », et « Partage » représentent respectivement les coûts associés aux cultures pour chaque interaction modélisée : positionnement à l'ombre ou au soleil, compétition pour l'eau, partage de l'eau. Les cases en surbrillance verte, rouge et orange désignent pour chaque culture les types d'unités spatiales sur lesquels elles sont associées respectivement au plus faible coût total des interactions, au plus fort coût total, et à un coût total intermédiaire.

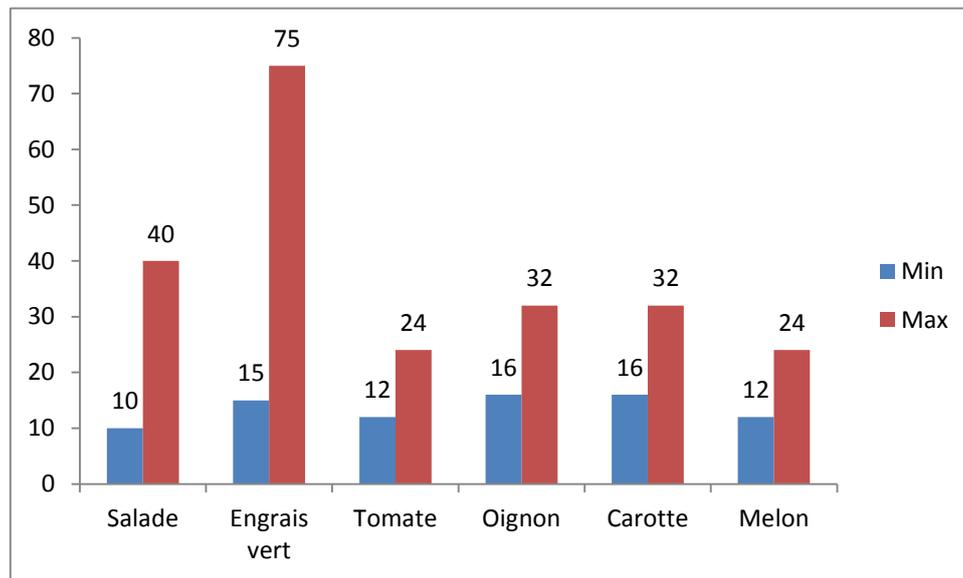


Figure 17 : Fourchettes min-max d'unités spatiales affectées à chaque culture

III.3.3 - Analyse des résultats du modèle de preuve de concept

III.3.3.1 Scénarios de modélisation

a) Typologie des unités spatiales

Les interactions modélisées pour la preuve de concept donnent lieu à une typologie des unités spatiales à chaque pas de temps, selon que l'unité est à l'ombre ou au soleil quand les arbres ont des feuilles, et selon la présence ou non de racines d'arbres dans le sol de l'unité. Etant donné que dans le modèle toutes les unités spatiales à l'ombre ont des racines dans leur sol, 3 types d'unités spatiales existent : les unités à l'ombre, et donc avec racines (type OR), les unités au soleil avec racines (type SR) et les unités au soleil sans racines (type S). Le type d'une unité spatiale varie au cours du temps, puisque l'ombre n'est pas prise en compte en période 1, et que les zones d'extension des racines des arbres s'agrandissent au fil du temps, changeant donc à chaque période de modélisation.

b) Fonctions de coût des interactions

Le choix des valeurs des fonctions de coût des interactions a une influence sur les solutions trouvées par le modèle. Un jeu de fonctions de coût qualifié d'« équilibré » est déterminé comme suit :

- Positionnement à l'ombre ou au soleil : coûts de 0, 10 ou 20 selon la sensibilité de la culture maraîchère.
- Compétition pour l'eau : coûts de 0, 10, 20 ou 30 selon le système racinaire de la culture, et ses besoins en eau.
- Partage de l'eau entre arbres et cultures : manque à gagner de 10 quand le partage n'est pas en place.

Pour ce jeu de coûts équilibrés, il résulte un coût total associé à chaque culture maraîchère selon le type d'unité spatiale sur laquelle elle est positionnée, comme résumé dans le Tableau 8. Ces coûts sont déterminants pour le placement des cultures sur les unités spatiales en fonction de la position des arbres.

c) Mixité des cultures maraîchères

Sans contraintes de mixité des cultures maraîchères dans le modèle, les solutions obtenues n'intègrent que les cultures de coûts minimaux à chaque saison, à savoir les salades et les engrais verts. Pour cette raison, des contraintes de mixité des cultures sont introduites, avec des fourchettes de nombres minimaux et maximaux d'unités spatiales affectées à chaque culture en fonction de la saison (Figure 17). Les nombres minimaux sont choisis de sorte qu'à chaque saison il y ait une mixité minimale des cultures en laissant suffisamment d'unités spatiales « libres » pour positionner des arbres ; à titre d'exemple, la saison la plus contrainte est l'été, avec 5 types de cultures (salade, tomate, oignon, carotte et melon), pour un minimum total en cultures maraîchères de 66 unités (10+16+12+16+12), soit 34 unités libres pour les arbres. Les nombres maximaux sont choisis pour qu'à chaque saison il y ait suffisamment de cultures à positionner sur les unités sans arbres, en évitant au maximum les sols nus ; par exemple au printemps, avec 3 types de cultures (salade, tomate et oignon), le maximum total est 96 (40+24+32), soit seulement 4 unités pour les arbres et les sols nus.

d) Scénarios

Pour évaluer les capacités du modèle à prendre en compte les différentes interactions modélisées, les scénarios suivants sont testés :

- Jeu de fonctions de coût avec une plus grande importance donnée aux impacts, positifs et négatifs, du positionnement des cultures à l'ombre ou au soleil.
- Jeu de fonctions de coût avec une plus grande importance donnée aux impacts négatifs de la compétition pour l'eau.

Type unité spatiale	Ombre Racines (OR)				Soleil Racines (SR)				Soleil Pas de racines (S)			
	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total
Sol nu	0	0	10	10	0	0	10	10	0	0	0	0
Salade Printemps	100	0	0	100	0	0	0	0	0	0	10	10
Salade Eté	0	10	0	10	200	10	0	210	200	0	0	200
Salade Automne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Tomate	100	30	0	130	100	30	0	130	100	0	10	110
Melon	200	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	100	20	0	120	0	20	0	20	0	0	10	10
Oignon	300	0	0	300	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert intermédiaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20

Tableau 9 : Fonctions de coût des interactions – Ombre/soleil

Type unité spatiale	Ombre Racines (OR)				Soleil Racines (SR)				Soleil Pas de racines (S)			
	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total
Sol nu	0	0	10	10	0	0	10	10	0	0	0	0
Salade Printemps	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10	10
Salade Eté	0	100	0	100	20	100	0	120	20	0	0	20
Salade Automne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Tomate	10	300	0	310	10	300	0	310	10	0	10	20
Melon	20	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	10	200	0	210	0	200	0	200	0	0	10	10
Oignon	30	0	0	30	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Engrais vert intermédiaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20

Tableau 10 : Fonctions de coût des interactions - Compétition

Type unité spatiale	Ombre Racines (OR)				Soleil Racines (SR)				Soleil Pas de racines (S)			
	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total	Posit	Compét	Partage	Total
Sol nu	0	0	100	100	0	0	100	100	0	0	0	0
Salade Printemps	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	100	100
Salade Eté	0	10	0	10	20	10	0	30	20	0	0	20
Salade Automne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Tomate	10	30	0	40	10	30	0	40	10	0	100	110
Melon	20	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Carotte	10	20	0	30	0	20	0	20	0	0	100	100
Oignon	30	0	0	30	0	0	0	0	0	0	100	100
Engrais vert court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Engrais vert intermédiaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	200

Tableau 11: Fonctions de coût des interactions - Partage

Les colonnes « Posit », « Compét », et « Partage » représentent respectivement les coûts associés aux cultures pour chaque interaction modélisée : positionnement à l'ombre ou au soleil, compétition pour l'eau, partage de l'eau. Les cases en surbrillance verte, rouge et orange désignent pour chaque culture les types d'unités spatiales sur lesquels elles sont associées respectivement au plus faible coût total des interactions, au plus fort coût total, et à un coût total intermédiaire.

- Jeu de fonctions de coût avec une plus grande importance donnée aux gains potentiels liés au partage de l'eau.
- Jeu de fonctions de coût équilibré, décrit dans le Tableau 8, qui donne une importance équivalente aux impacts des différents types d'interactions.

Dans la suite du document, ces scénarios sont nommés respectivement « ombre/soleil », « compétition », « partage » et « équilibré ».

Pour donner une plus grande importance à un critère, les coûts qui lui sont associés sont multipliés par 10, donnant lieu à de nouveaux coûts respectifs de cultures maraîchères en fonction de leur positionnement sur les unités spatiales (Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11). Cette multiplication des coûts par 10 est excessive par rapport à une représentation réaliste, mais elle a une bonne valeur démonstrative de prise en compte des interactions. Dans des cas réels, multiplier les coûts par 2 ou 3 doit suffire à donner plus d'importance à une interaction.

L'analyse des résultats obtenus fait l'objet du paragraphe suivant III.3.3.3.

e) Dispersion des cultures maraîchères

Les scénarios précédents sont exécutés sans contraintes de non-dispersion des cultures maraîchères dans les modèles, pouvant donc mener potentiellement à des solutions où les unités spatiales affectées à une même culture maraîchère sont dispersées sur la parcelle.

Comme décrit en annexe 2, les règles de non-dispersion des cultures maraîchères ont été codées avec des contraintes binaires. Ce codage binaire aboutit à un jeu de contraintes volumineux (2836 contraintes) par rapport au reste du modèle qui en comporte 6621 contraintes, le faisant donc grossir de 40%.

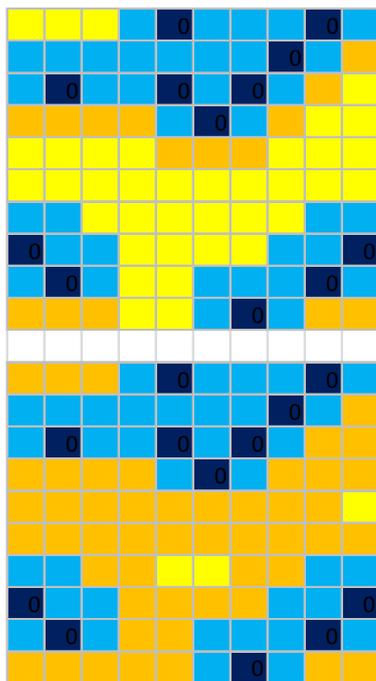
Le modèle avec contraintes de non-dispersion est d'abord testé sur le scénario équilibré, pour analyser son efficacité sur la dispersion des cultures ; en cas de résultats satisfaisants sur ce scénario, ce modèle sera appliqué aux autres scénarios. Deux types de tests sont réalisés :

- Influence du coût des contraintes de dispersion sur les solutions obtenues : comparaison des résultats pour des coûts unitaires de 1 et de 10 par dispersion du maraîchage, c'est-à-dire par couple d'unités spatiales adjacentes ne portant pas la même culture maraîchère.
- Efficacité du modèle avec jeu de contraintes de non-dispersion, en prenant comme référence la solution de moindre coût obtenue pour le scénario équilibré sans ces contraintes : les solutions du modèle avec contraintes de non-dispersion doivent être « moins dispersées » que la solution obtenue avec le modèle sans ces contraintes.

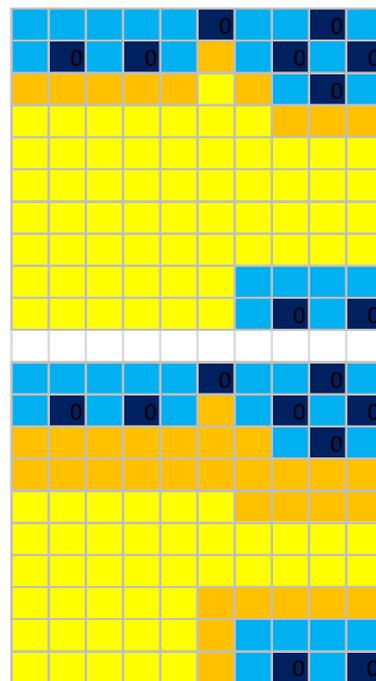
III.3.3.2 Exécution des modèles

L'exécution des scénarios a été testée avec diverses options du solveur *toulbar2*, correspondant à différentes heuristiques de recherche des solutions. Les solutions trouvées avec ces diverses options ont été analysées (voir détail des résultats en annexe 3), pour aboutir au choix d'utiliser préférentiellement l'heuristique à divergence limitée (Limited Discrepancy Search), donnant des solutions avec des proportions d'arbres entrant dans la catégorie des stratégies agroforestières stables (comme décrit au paragraphe II.2.1.3), avec un meilleur respect des contraintes de mixité des cultures, et avec des coûts totaux moindres.

Néanmoins, quelle que soit l'option choisie, l'exécution des modèles avec le solveur *toulbar2* n'a pas abouti à des solutions prouvées optimales dans des temps d'exécution raisonnables (plusieurs heures). Ces solutions sont bien des solutions au problème posé, au sens où elles respectent toutes les contraintes dures, mais le solveur ne parvient pas à prouver que le coût total des contraintes floues dans ces solutions est le plus bas possible. Pour trouver des solutions de coûts les plus bas possibles, il a été décidé de mettre en œuvre un processus d'exécution en 2 étapes, sans preuve d'optimum : la première étape consiste à exécuter le modèle jusqu'à ce qu'il se stabilise, au bout d'une heure environ, sur une solution de plus faible coût dans sa recherche ; le choix de positionnement des arbres dans cette solution est alors utilisé comme fixé pour une seconde

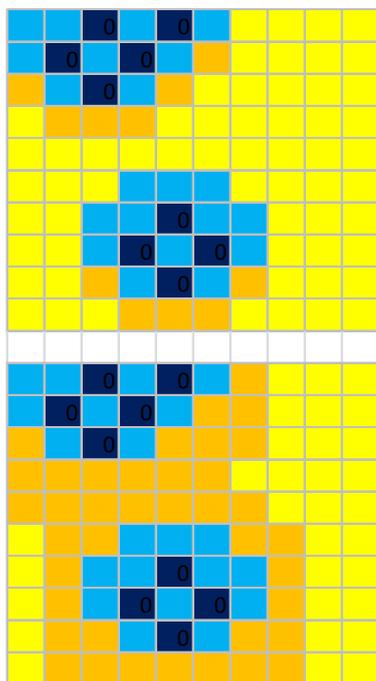


ARB	Arbre
■ (bleu foncé)	Ombre Racines
■ (orange)	Soleil Racines
■ (jaune)	Soleil

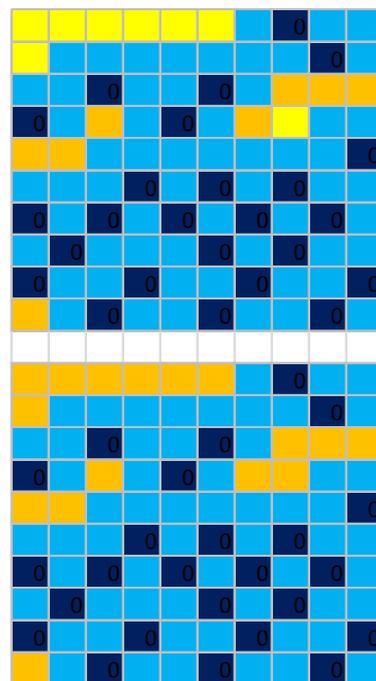


Scénario équilibré – 12 arbres
 36 unités à l'ombre
 37 unités sans racines période 2
 3 unités sans racines période 3

Scénario compétition – 9 arbres
 21 unités à l'ombre
 60 unités sans racines période 2
 41 unités sans racines période 3



Scénario ombre/soleil – 9 arbres
 21 unités à l'ombre
 59 unités sans racines période 2
 31 unités sans racines période 3



Scénario partage – 25 arbres
 59 unités à l'ombre
 8 unités sans racines période 2
 0 unités sans racines période 3

Figure 18 : Résultats de modélisation - Positionnement des arbres

Pour chaque scénario analysé, représentation de la parcelle modélisée aux périodes 2 (en haut) et 3 (en bas). Les unités spatiales bleu foncé représentent les arbres, les unités bleu clair, oranges et jaunes représentent respectivement les unités spatiales à l'ombre (type OR), au soleil avec racines (type SR), et au soleil sans racines (type S).

exécution visant à trouver une solution de positionnement du maraîchage à plus faible coût avec les arbres pré-positionnés par la solution précédente. Cette seconde exécution, de longue durée (24 heures environ), ne se termine pas non plus par une preuve d'optimum, mais la solution de plus faible coût trouvée par le solveur au bout de ce temps d'exécution, estimé suffisamment long, est retenue pour les analyses.

III.3.3.3 Analyse des résultats

Pour chaque scénario testé, la solution obtenue en fin de deuxième phase d'exécution (voir annexe 4) est analysée en termes de :

- Nombre d'arbres et délimitation de zones d'interaction autour des arbres.
- Mixité des cultures maraîchères.
- Positionnement de ces cultures par rapport aux zones d'interaction délimitées autour des arbres.

Etant donné qu'en première période de modélisation les arbres sont considérés comme n'ayant pas d'influence hors de leurs propres unités spatiales, que ce soit pour l'interception de la lumière ou l'extension racinaire, seuls les résultats des périodes 2 et 3 sont analysés, car ce sont les seules périodes pendant lesquelles les interactions entre arbres et cultures sont en œuvre.

a) Positionnement des arbres

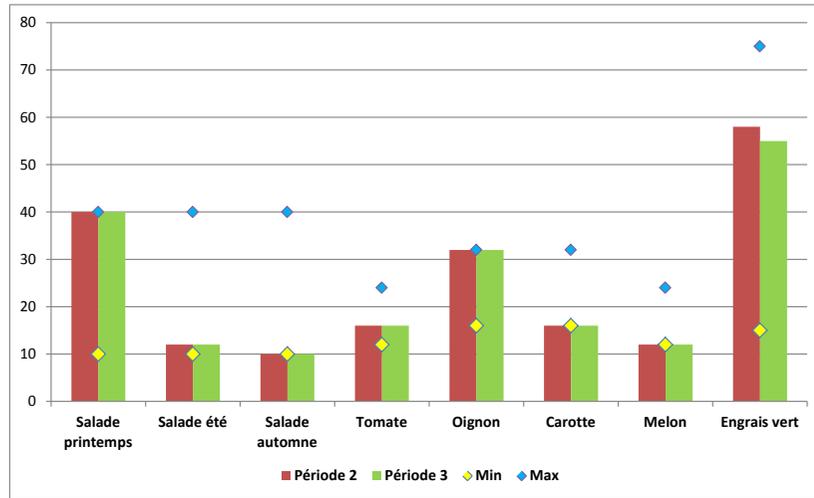
La Figure 18 représente, pour chacun des 4 scénarios étudiés, la position des arbres et la répartition des unités spatiales selon leur type (voir la définition de ces types au paragraphe III.3.3.1a)), aux périodes 2 et 3 de modélisation.

En prenant le scénario équilibré comme référence d'analyse comparative avec les 3 autres scénarios :

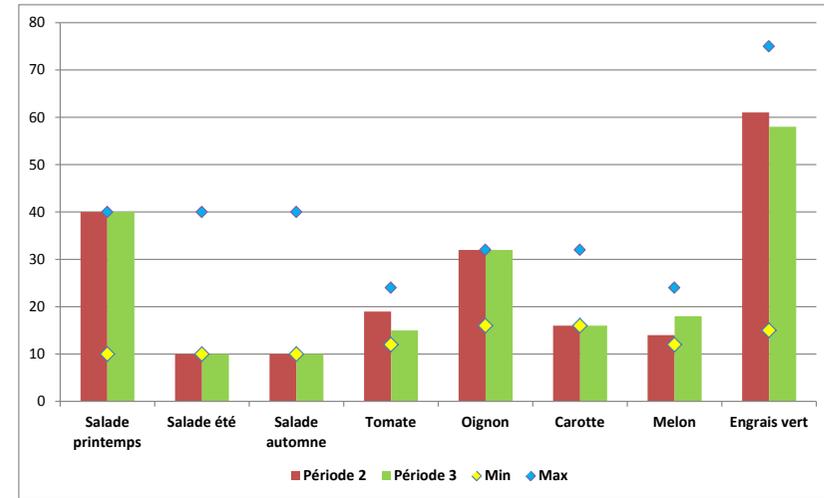
- Lorsque les interactions liées à l'ombre sous les arbres sont plus coûteuses que les autres, la solution retenue comporte moins d'arbres (9 au lieu de 12), et donc aussi moins d'unités spatiales à l'ombre (36 contre 21). Ceci permet de limiter les coûts de positionnement à l'ombre d'espèces maraîchères pour lesquelles l'ombre n'est pas bénéfique, c'est-à-dire la majorité des espèces, tout en assurant un minimum de ces positions à l'ombre pour les espèces qui en bénéficient, et sont requises dans le mix de production.
- Lorsque les interactions liées à la compétition pour l'eau sont prépondérantes, la solution retenue comporte également moins d'arbres (encore 9 au lieu de 12), avec pour effet une limitation des unités spatiales où les racines sont présentes (60 et 41 unités en périodes 2 et 3 respectivement, contre 37 et 3 pour le scénario équilibré). L'objectif ici est de limiter les unités spatiales où une compétition peut avoir lieu en été, afin de positionner à moindre coût les cultures qui génèrent potentiellement cette compétition, à savoir salades, carottes et tomates, et sont requises dans le mix.
- Lorsque le partage de l'eau est prépondérant, la solution retenue inclut beaucoup d'arbres (25 contre 12), afin d'assurer une présence maximale de racines sur les unités spatiales dès la période 2 (8 unités seulement contre 37 pour le scénario équilibré). Le but visé est alors de maximiser les opportunités de partage de l'eau, c'est-à-dire avoir la présence de racines d'arbres partout où il y a des cultures maraîchères.

La solution du scénario équilibré est un intermédiaire entre les solutions des autres scénarios, qui correspond à un compromis entre les différentes interactions sans en privilégier une plutôt qu'une autre. La typologie des unités spatiales y est équilibrée entre unités à l'ombre, unités au soleil avec ou sans racines. Ce scénario présente en outre une évolution importante des proportions des unités avec/sans racines entre les périodes 2 et 3, qui se retrouve moins dans les autres cas.

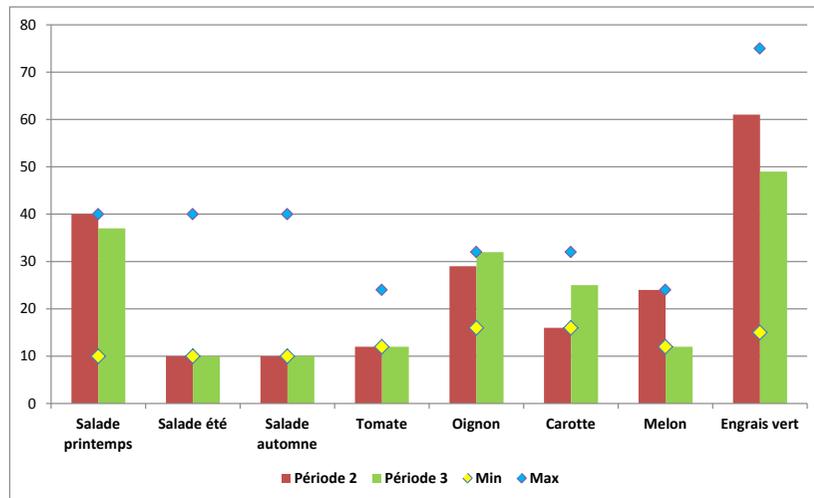
Selon le scénario choisi pour le modèle, un même nombre d'arbres dans une solution peut donner lieu à des typologies d'unités spatiales différentes, en fonction du positionnement de ces mêmes



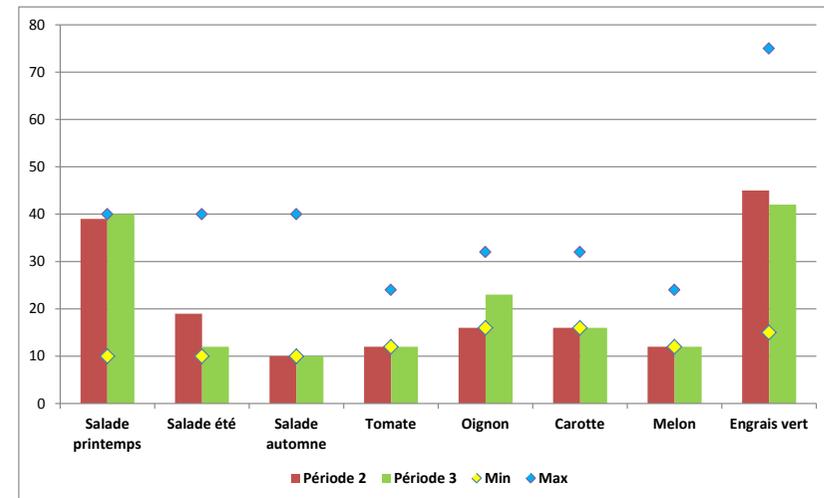
Scénario équilibré



Scénario compétition



Scénario ombre/soleil



Scénario partage

Figure 19 : Résultats de modélisation - Répartition des cultures maraîchères

Chaque bâton est un nombre d'unités spatiales affectées à une culture maraîchère sur la période 2 (rouge) ou 3 (vert). Les marqueurs jaunes et bleus indiquent les contraintes min et max de cardinalité pour chaque type de culture, comme décrites au paragraphe III.3.3.1c).

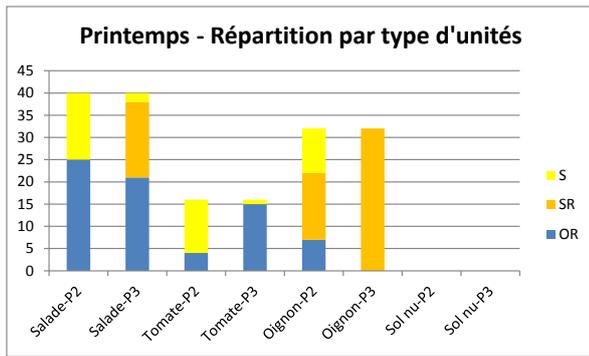
arbres : c'est le cas entre les scénarios ombre/soleil et compétition, qui ont des solutions avec 9 arbres, mais des configurations d'unités spatiales avec ou sans racines bien distinctes.

b) Mixité des cultures maraîchères

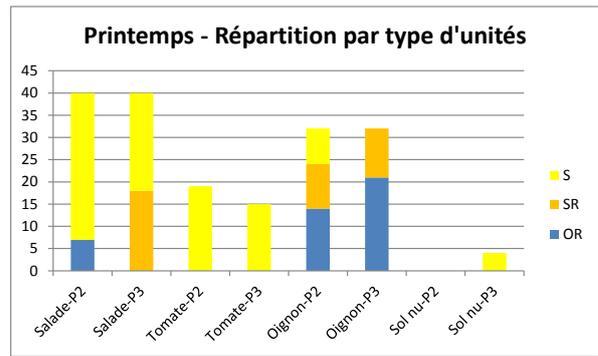
La Figure 19 représente, pour chacun des scénarios étudiés, la mixité des cultures aux périodes 2 et 3 dans les solutions retenues. De façon générale, les contraintes de cardinalité sont bien respectées dans les solutions des 4 scénarios. Il n'y a pas de grosses différences de mixité des cultures d'un scénario à l'autre car, si les différentes cultures maraîchères ont des niveaux de sensibilité différents à l'ombre ou au soleil, et/ou à la présence de racines, la réponse du solveur aux modèles avec des critères prépondérants distincts n'est pas de jouer sur la mixité des cultures, mais plutôt sur le choix de positionnement des arbres afin de disposer de nombres adéquats d'unités spatiales des divers types pour affecter les cultures au mieux selon leurs sensibilités.

Les quantités de certaines cultures sont dans le haut des fourchettes qui leur sont assignées (par exemple : les oignons et salades de printemps), tandis que d'autres sont dans le bas de ces fourchettes (par exemple : les tomates et les salades d'automne) ; à ceci plusieurs explications :

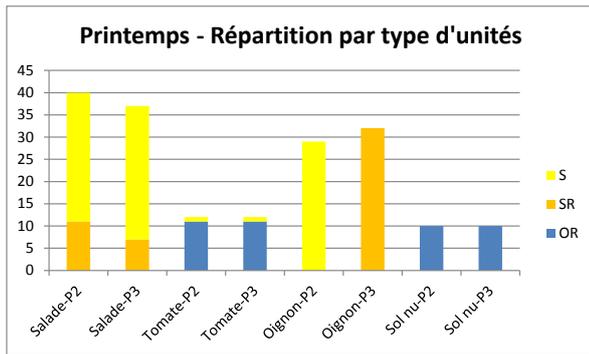
- Les coûts des cultures majoritaires sont inférieurs aux coûts des autres cultures qui sont présentes à la même saison.
- Les cultures majoritaires ont de faibles coûts sur plus de types d'unités spatiales, et peuvent donc être positionnées plus facilement, sur plus d'unités spatiales disponibles.
- Dans le cas particulier de la saison automne, les engrais verts sont préférés aux salades, même s'ils ont des coûts identiques, car ils permettent de couvrir le sol en saison hiver, et ainsi limiter le nombre de sols nus. En effet, dans le modèle actuel, aucune culture ne démarre en hiver, donc après une salade d'automne le sol est obligatoirement nu en hiver.



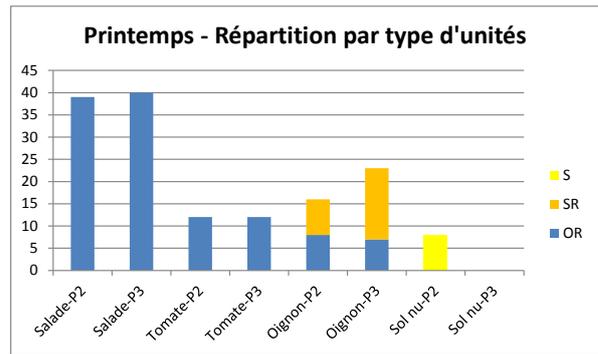
Scénario équilibré



Scénario compétition

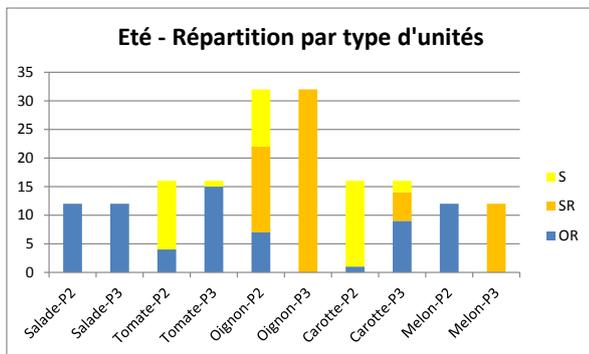


Scénario ombre/soleil

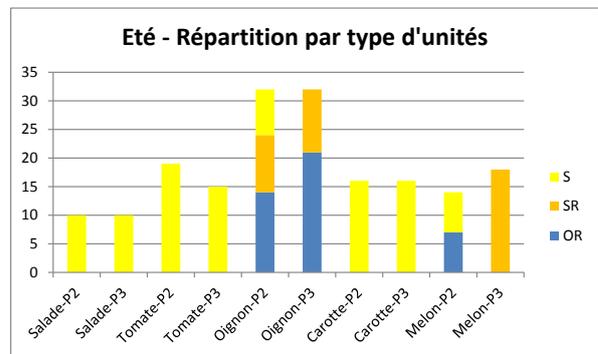


Scénario partage

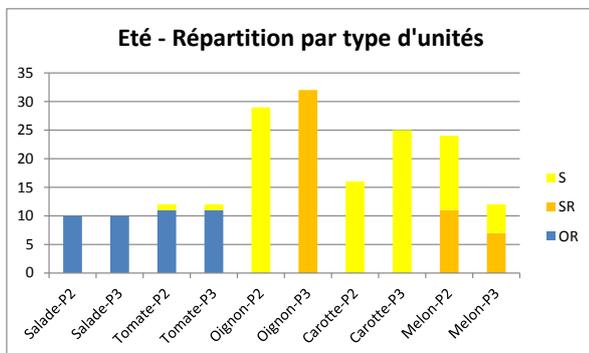
Figure 20 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères – Printemps



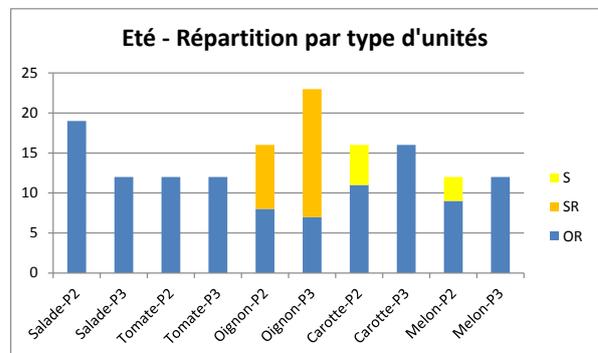
Scénario équilibré



Scénario compétition



Scénario ombre/soleil



Scénario partage

Figure 21 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères - Eté

c) Positionnement des cultures maraîchères

Les Figure 20 et Figure 21 représentent le positionnement des différentes cultures maraîchères sur les différents type d'unités spatiales (OR, SR, S) aux périodes 2 et 3, pour les saisons printemps et été respectivement, et pour les 4 scénarios étudiés.

Comme décrit au paragraphe III.3.3.1 : chaque culture maraîchère est associée à un coût total en fonction de l'unité spatiale sur laquelle elle est positionnée, et en fonction du coût relatif des interactions dans les divers scénarios,

Par exemple, pour la salade de printemps, en reprenant les Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11 introduits précédemment :

- Pour le scénario équilibré : coûts 10, 0, 10 respectivement sur les unités spatiales OR, SR, S.
- Pour le scénario ombre/soleil : coûts 100, 0, 10 respectivement.
- Pour le scénario compétition : coûts 10, 0, 10 respectivement.
- Pour le scénario partage : coûts 10, 0, 100 respectivement.

Ces coûts respectifs influencent le positionnement des salades de printemps selon les scénarios :

- Dans le scénario ombre/soleil, il n'y a aucune salade de printemps positionnée à l'ombre (unités de type OR).
- Dans le scénario partage, il n'y a pas de salades de printemps positionnées où il n'y a pas de racines (unités de type S).
- Dans les 2 autres scénarios, les salades de printemps ont un coût maximum de 10 sur les unités qui lui sont les moins favorables. Ce coût est moindre par rapport aux coûts associés aux autres cultures, et explique qu'alors les salades soient positionnées sur tous les types d'unités, celles qui sont disponibles après avoir positionné les autres cultures.

Pour l'été, seule saison durant laquelle les interactions de compétition sont actives :

- Dans le scénario compétition, les cultures générant de la compétition (salade, carotte, tomate) sont systématiquement positionnées où il n'y a pas de racines d'arbres (unités spatiales de type S).
- Dans les autres scénarios, la salade d'été, qui est pénalisée quand elle est au soleil, avec un coût supérieur à celui engendré par la compétition, est alors positionnée plutôt sur les unités à l'ombre même si ces dernières ont des racines d'arbres dans leur sol.

Culture	Coût OR	Coût SR	Coût S	Nb OR	Nb SR	Nb S
Scénario équilibré						
Sol nu	10	10	0	13	16	31
Salade Printemps	10	0	10	46	17	17
Salade Eté	10	30	20	24	0	0
Salade Automne	0	0	10	15	4	1
Tomate	40	40	20	19	0	13
Melon	20	0	0	12	12	0
Carotte	30	20	10	10	5	17
Oignon	30	0	10	7	47	10
EV court	0	0	10	5	6	0
EV intermédiaire	0	0	20	42	49	22
Scénario ombre/soleil						
Sol nu	10	10	0	20	0	60
Salade Printemps	100	0	10	0	18	59
Salade Eté	10	210	200	20	0	0
Salade Automne	0	0	10	2	5	13
Tomate	130	130	110	22	0	2
Melon	200	0	0	0	18	18
Carotte	120	20	10	0	0	41
Oignon	300	0	10	0	32	29
EV court	0	0	10	0	5	6
EV intermédiaire	0	0	20	40	40	30
Scénario compétition						
Sol nu	10	10	0	0	0	64
Salade Printemps	10	0	10	7	18	55
Salade Eté	100	120	20	0	0	20
Salade Automne	0	0	10	1	6	13
Tomate	310	310	20	0	0	34
Melon	20	0	0	7	18	7
Carotte	210	200	10	0	0	32
Oignon	30	0	10	35	21	8
EV court	0	0	10	5	1	5
EV intermédiaire	0	0	20	36	32	51
Scénario partage						
Sol nu	100	100	0	43	9	16
Salade Printemps	10	0	100	79	0	0
Salade Eté	10	30	20	31	0	0
Salade Automne	0	0	100	19	1	0
Tomate	40	40	110	24	0	0
Melon	20	0	0	21	0	3
Carotte	30	20	100	27	0	5
Oignon	30	0	100	15	24	0
EV court	0	0	100	8	3	0
EV intermédiaire	0	0	200	64	20	3

Tableau 12 : Résultats de modélisation - Positionnement des cultures maraîchères – Récapitulatif

Les colonnes « Coût OR », « Coût SR » et « Coût S » sont les coûts globaux des cultures en fonction du type d'unités spatiales sur lesquelles elles sont positionnées, incluant toutes les saisons où elle est présente ; pour une culture étalée sur plusieurs saisons, le coût global associé est la somme des coûts qui lui sont affectés aux saisons où elle est présente.

Les colonnes « Nb OR », « Nb SR » et « Nb S » sont les nombres d'unités spatiales affectées à une culture, quelle que soit sa durée ; ainsi, pour une culture étalée sur plusieurs saisons, chaque unité affectée est comptabilisée une seule fois pour toutes les saisons où la culture est présente.

Le Tableau 12 récapitule les positionnements des cultures sur les types d'unités spatiales pour les 4 scénarios étudiés. Ce tableau peut s'analyser selon deux grilles de lecture :

- Analyse ligne par ligne, au niveau d'une culture maraîchère : comme déjà expliqué au paragraphe III.3.3.1, pour chaque scénario, chaque culture est associée à un coût total en fonction du type d'unité spatiale à laquelle elle est affectée (3 colonnes de gauche du tableau) ; une ligne du tableau montre que la solution trouvée pour un scénario affecte au mieux les cultures sur les types d'unités pour lesquelles elles sont associées à un coût minimal. Ceci est d'autant plus vrai que les différentiels de coûts entre types d'unités pour une même culture sont importants.
- Analyse colonne par colonne, au niveau d'un type d'unités spatiales : une colonne du tableau pour un scénario montre que sur un type d'unités spatiales donné, la solution trouvée affecte au mieux les cultures de moindres coûts sur ces unités. Ceci est d'autant plus vrai que les différentiels de coûts entre cultures sur un même type d'unités sont importants.

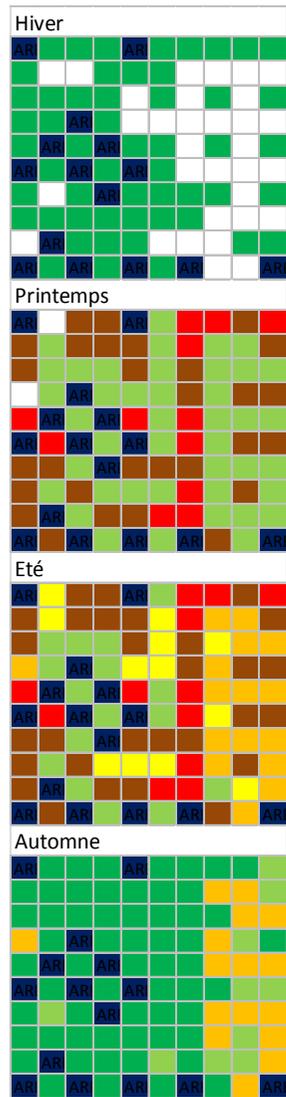
Dans le scénario ombre/soleil, le coût de la tomate est élevé quel que soit le type d'unités, avec peu d'écarts entre les coûts : ceci est dû à ce que la tomate est pénalisée par l'ombre au printemps, mais bénéficie de l'ombre en été (donc est pénalisée par le soleil à cette saison), ce qui fait que globalement pour une culture de tomates regroupant toutes les saisons, la tomate a une pénalité de positionnement sur tous les types d'unités. Il en résulte qu'il n'y a pas véritablement de type d'unité spatiale préférentiel pour la positionner dans ce scénario, et qu'alors le choix du solveur se fait relativement aux coûts des autres cultures aux mêmes positions.

De façon générale, les résultats reflètent bien les coûts relatifs des cultures maraîchères en fonction des unités spatiales où elles sont positionnées, montrant que la solution retenue à l'exécution du modèle tend à respecter au mieux les contraintes les plus fortes. Dans le cas où toutes les interactions ont des poids équivalents (scénario équilibré), les résultats sont moins tranchés car il y a peu d'écarts de coûts entre les cultures, et donc chaque choix de positionnement de culture maraîchère fait par le solveur dans une solution pourrait être remplacé par un choix de coût équivalent.

d) Une solution adaptée à chaque contexte

Les résultats ci-dessus montrent que pour obtenir une solution répondant à un cas d'étude particulier, le modèle doit être paramétré pour refléter les critères prépondérants au donneur d'ordre. Le paramétrage se fait simplement en modulant les coûts affectés à chaque interaction, pour chaque culture et chaque saison. Le modèle construit n'est donc pas un modèle générique présentant le verger maraîcher idéal, mais un modèle à instancier au cas par cas. Il est envisageable de l'utiliser itérativement pour un même cas en ajustant les contraintes au vu des premières solutions obtenues, et/ou en fixant des éléments, arbres ou cultures, qui correspondraient à des préférences de conception.

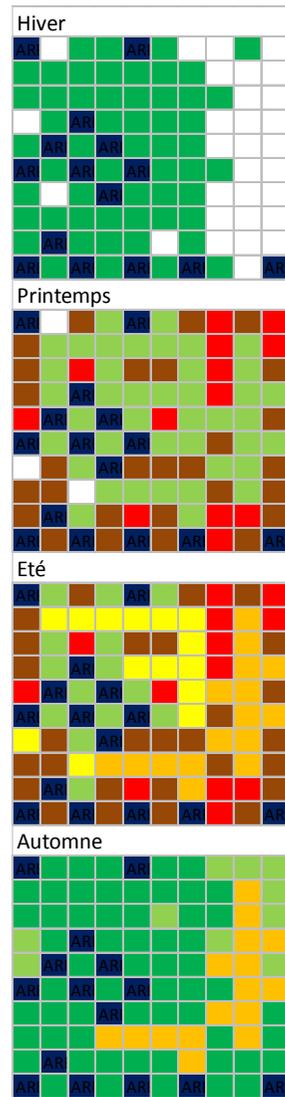
Période 2
Coût dispersion = 1



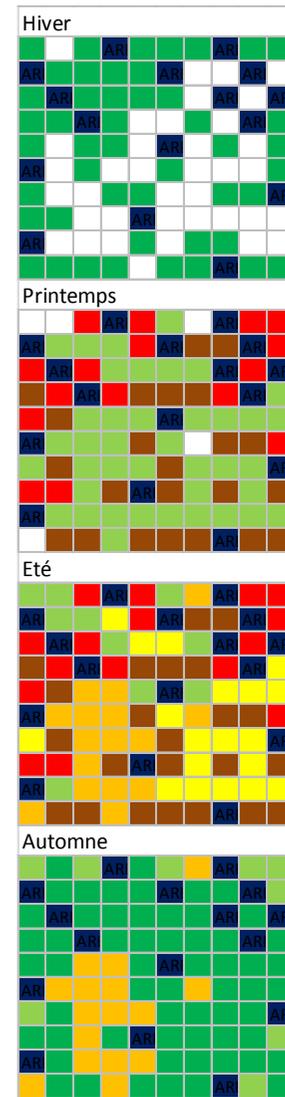
Période 2
Coût dispersion = 10



Période 3
Coût dispersion = 1



Période 3
Coût dispersion = 10



Légende

ARB	Arbre
	Salade
	Tomate
	Oignon
	Carotte
	Melon
	Engrais vert
	Sol nu

Figure 22 : Analyse de dispersion des cultures maraîchères

e) Dispersion des cultures maraîchères

Influence du coût des dispersions

Les solutions obtenues avec des coûts de dispersion de 1 et 10 ne semblent pas beaucoup différer du point de vue du regroupement des cultures maraîchères. Alors que des coûts de 10 pour la dispersion, de même ordre que les coûts des interactions agroforestières, devraient inciter le solveur à faire des choix de regroupement des cultures, ce dernier semble encore privilégier les autres interactions, en positionnant les cultures par rapport à la typologie des unités spatiales plutôt que par rapport au regroupement des cultures. La Figure 22 représente le positionnement des cultures sur les parcelles pour les 8 saisons étudiées, à gauche pour la solution avec des coûts de dispersion à 1, et à droite pour la solution avec des coûts de dispersion à 10 : en l'absence d'outil de mesure rigoureux de la dispersion, la comparaison des 2 solutions à l'œil nu ne montre pas de regroupement flagrant des cultures sur la solution à coûts 10 par rapport à celle à coûts 1.

Des tests ont été réalisés en augmentant encore les coûts de dispersion, à 20 et à 50 : un effet sur la non-dispersion des cultures maraîchères est alors perceptible à l'œil nu sur les solutions obtenues, mais au détriment du respect des autres contraintes, mixité et interactions agroforestières. Avec une telle importance donnée aux contraintes de non-dispersion, le modèle s'écarte trop de son objectif initial, à savoir la représentation des interactions entre arbres et cultures.

Efficacité du modèle avec contraintes de non-dispersion

Pour tester cette efficacité, la solution de moindre coût analysée pour le scénario équilibré est reprise : le coût de dispersion de cette solution est d'abord mesuré en lui appliquant le modèle avec jeu de contraintes de non-dispersion à coût 1. Le coût total obtenu pour la solution est 14182. Le modèle avec contraintes de non-dispersion est ensuite exécuté avec le positionnement des arbres de la solution précédente, afin de laisser le solveur trouver des solutions de positionnement du maraîchage meilleures du point de vue de la dispersion, donc a priori meilleures que la solution obtenue sans ces contraintes, d'un coût de 14182. Au bout de 24 heures d'exécution, le coût de la meilleure solution trouvée pour le modèle de non-dispersion est 16134, c'est-à-dire que cette solution est moins bonne du point de vue de la dispersion du maraîchage que celle trouvée au bout du même temps d'exécution avec le modèle sans les contraintes de non-dispersion. Il semblerait donc que le jeu de contraintes de non-dispersion tel qu'il est codé actuellement ne soit pas efficace pour représenter ces contraintes, et mener à des solutions les prenant bien en compte.

Les deux analyses ci-dessus tendent à prouver que les contraintes de non-dispersion proposées pour le modèle de preuve de concept ne sont pas efficaces dans ce contexte, en association avec les autres contraintes.

III.4 - Discussion

III.4.1 - Limites de l'étude

III.4.1.1 Limites du modèle construit

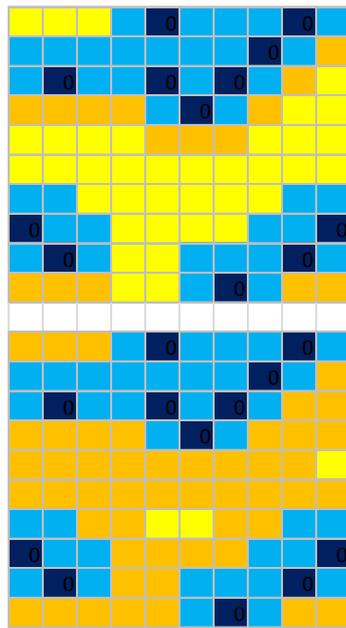
Le modèle ayant été construit pour une preuve de concept, il comporte les limites inhérentes à cet exercice. Ces limites découlent des choix faits pour construire un modèle à vocation démonstrative, à commencer par les choix de réduction des échelles de représentation spatiales et temporelles.

Pour ce qui concerne la dimension spatiale, la granularité de division de la parcelle est plus grande que celle initialement souhaitée, avec un découpage en 100 unités au lieu de 1000. Cette réduction ne génère pas de limite par rapport à la surface totale représentée, qui peut être suffisante pour configurer un motif d'agencement de verger maraîcher sur 1000 m², avec un détail de motif d'une dizaine de m² (taille de l'unité spatiale du modèle). La réduction de cette dimension génère plutôt une limite par rapport à la précision de représentation des phénomènes, qui pourraient nécessiter une granularité spatiale plus fine que des zones de 10 et 100 m² autour des arbres ; par exemple, les zones d'extension racinaire des arbres pourraient être représentées plus finement, avec des zones de surface intermédiaire entre 10 et 100 m². Toutefois, le modèle visé reste un modèle macroscopique des interactions au niveau systémique, et il serait probablement peu cohérent d'y intégrer des phénomènes microscopiques.

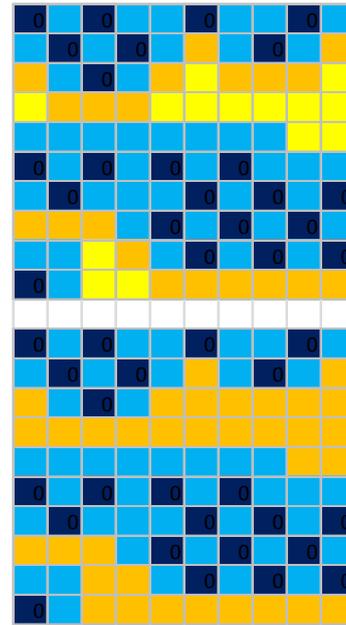
L'échelle temporelle a été doublement réduite, en représentant 3 phases de croissance des arbres, au lieu de distinguer une variation de croissance annuelle, et en représentant 4 saisons dans l'année au lieu de 12 mois bien différenciés. La première réduction n'apporte pas de réelle limite aux résultats : la croissance des arbres influe sur la taille des zones d'ombrage et d'extension des racines ; or, la représentation de 3 périodes avec des définitions de zones différentes est suffisante pour modéliser l'évolution temporelle des interactions choisies. La deuxième réduction d'échelle temporelle introduit par contre une limite à la représentation d'informations qui varient mensuellement, et non avec une granularité saisonnière. C'est le cas des temps de travaux, qui fluctuent beaucoup d'un mois à l'autre sur une même saison, en fonction des dates de récolte : par exemple, pour les pommes Gala, le pic de charge de récolte se concentre sur 3 semaines, de mi-août à début septembre (voir Tableau 1 du II.2.2.1), qui coïncide avec une période de récolte des tomates plein champ, elle aussi très demandeuse en main d'œuvre (voir fiche espèce tomate en annexe 1). Le manque de granularité mensuelle a empêché de bien modéliser les contraintes d'organisation du travail : elles sont représentées de façon indirecte dans le modèle actuel, par le biais des contraintes de mixité des cultures à chaque saison, ce qui n'est pas satisfaisant car trop approximatif.

L'impact important des dates de récolte sur la répartition de la charge de travail au cours de l'année implique que le modèle devrait aussi intégrer une variabilité des espèces fruitières, avec des dates de récolte pouvant s'échelonner de fin mai pour les variétés précoces de cerises, à mi-octobre pour les variétés tardives de pommes : dans ce nouveau modèle, les dates de récolte deviendraient un critère de détermination des nombres d'arbres de chaque espèce à positionner dans le verger maraîcher. Les propositions d'agencement obtenues en résolvant ce nouveau modèle seraient donc différentes de celles obtenues avec le modèle actuel, d'autant plus que l'ajout de variabilité des espèces fruitières ne devrait pas s'arrêter aux seules dates de récoltes pour les temps de travaux, mais s'étendre à d'autres caractéristiques distinctives, par exemple la morphologie de l'arbre pour les zones d'ombrage ou son développement racinaire pour les zones d'interactions souterraines. L'utilisation d'arbres fruitiers génériques est une limite qui émane des choix faits pour la preuve de concept, du fait que l'introduction de multiples espèces fruitières demande une complexification du modèle, avec un plus grand domaine de valeurs des variables et une multiplication des variables pour représenter les caractéristiques distinctives des espèces.

Parallèlement, le choix d'un nombre réduit d'espèces maraîchères serait une limite pour un modèle ayant pour vocation la représentation de rotations maraîchères, mais ça n'est pas l'objectif premier du modèle étudié ici. La variabilité des 6 cultures choisies est suffisante pour modéliser les interactions sélectionnées, avec des caractéristiques bien distinctes pour ce qui concerne le



ARB	Arbre
■	Ombre Racines
■	Soleil Racines
■	Soleil

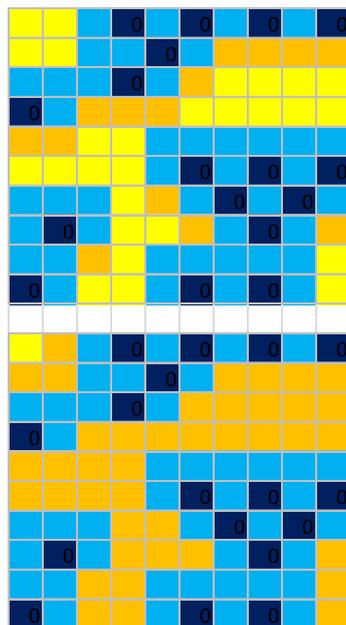


Solution 1 – 12 arbres – Coût 12620

36 unités à l'ombre
37 unités sans racines période 2
3 unités sans racines période 3

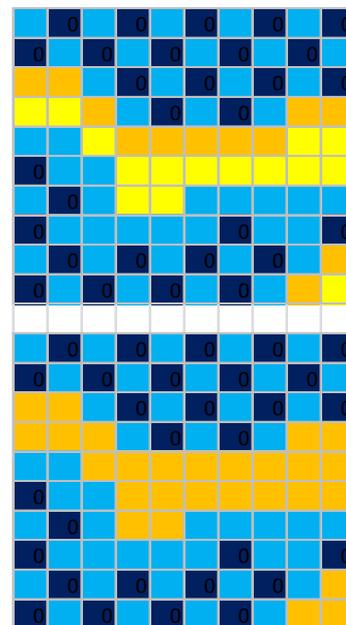
Solution 2 – 23 arbres – Coût 12620

43 unités à l'ombre
14 unités sans racines période 2
0 unités sans racines période 3



Solution 3 – 17 arbres – Coût 12630

42 unités à l'ombre
27 unités sans racines période 2
1 unité sans racines période 3



Solution 4 – 29 arbres – Coût 12670

44 unités à l'ombre
15 unités sans racines période 2
0 unités sans racines période 3

Figure 23: Agencement d'arbres sur la parcelle pour des solutions de coûts proches

La solution 1 est celle qui a été analysée en détail pour le scénario équilibré dans le paragraphe III.3.3.3

positionnement à l'ombre ou au soleil, et le développement des systèmes racinaires, influant sur la compétition avec les arbres. Les cultures maraîchères ont été modélisées en utilisant des données spécifiques d'espèces réelles, et nommées en tant que telles dans les analyses, mais il pourrait être envisagé de déterminer une typologie des espèces maraîchères vis-à-vis des interactions avec les arbres, et de modéliser le positionnement des cultures selon cette typologie, sans nommer explicitement telle ou telle espèce : les utilisateurs des solutions auraient alors libre choix des espèces à cultiver, en respectant la typologie.

Enfin, le choix des interactions modélisées est bien représentatif de la variabilité (spatiale, temporelle, impacts positifs et/ou négatifs) des types d'interactions à intégrer dans le modèle complet, mais il a une valeur agronomique limitée, par incomplétude de représentation des phénomènes physiques et biologiques à l'œuvre dans les systèmes agroforestiers, comme les régulations naturelles ou les compétitions et partages d'éléments nutritifs.

En plus de ces limites liées aux choix initiaux, la construction de la preuve de concept elle-même a montré une limite, concernant la modélisation des règles de minimisation de la dispersion des cultures maraîchères. La tentative d'ajout d'un jeu de contraintes binaires au modèle ne s'est pas révélée efficace, avec des solutions proposées n'améliorant pas significativement le regroupement des cultures maraîchères. Pour progresser sur la représentation de ces contraintes, et aboutir à des propositions d'agencement plus réalistes d'un point de vue opérationnel, il serait intéressant de disposer dans *toulbar2* d'une nouvelle fonction de type *SoftAllEqual()*, symétrique de la fonction *SoftAllDiff()*, déjà implémentée : cette nouvelle fonction devrait être développée afin de représenter les contraintes de proximité des cultures de façon plus performante que par des contraintes binaires, avec des contraintes natives permettant de mieux orienter la recherche de solutions par le solveur. En l'absence de cette fonction, une autre possibilité serait de mettre en place un traitement complémentaire d'analyse de toutes les solutions équivalentes correspondant à des permutations de cultures maraîchères pour un même agencement, et sélectionner celles pour lesquelles les cultures maraîchères sont les moins dispersées.

III.4.1.2 Portée des résultats analysés

Comme déjà évoqué, les analyses de résultats ont porté sur des solutions qui n'ont pas été prouvées optimales par le solveur : ce sont des solutions au problème posé, qui respectent toutes les contraintes strictes, mais pour lesquelles le solveur ne parvient pas à prouver qu'il n'y a pas de meilleures solutions, c'est-à-dire des solutions qui respectent mieux les contraintes floues, à coût total moindre. Les analyses ont néanmoins montré que les résultats obtenus avec ces solutions de faibles coûts, qui ne sont peut-être pas les meilleures, répondent correctement aux critères posés dans les différents scénarios. Il ne semble alors pas indispensable d'obtenir des solutions formellement optimales pour satisfaire le besoin de modélisation en phase préliminaire de conception de système, mais simplement exploiter des solutions de faibles coûts, qui suffisent à étayer des réflexions et définir des critères supplémentaires pour affiner le modèle.

Par ailleurs, pour chaque scénario étudié, une seule solution du modèle a été analysée en détail, alors qu'il existe plusieurs solutions de même coût, ou de coût proche, avec des combinaisons différentes de positionnement des arbres et cultures. Un traitement complémentaire de toutes les solutions de même coût pourrait être envisagé afin de distinguer les solutions qui sont uniquement des permutations des cultures maraîchères à des positions équivalentes (mêmes types d'unités spatiales), de celles qui sont des types d'agencements bien distincts, avec des arbres positionnés différemment. Dans ce dernier cas, la proposition de plusieurs solutions serait un plus pour la phase de conception, car ces différentes solutions constituent différents agencements de vergers maraîchers à considérer. A titre d'exemple que des solutions de coûts proches peuvent correspondre à des agencements bien distincts, le positionnement des arbres a été étudié pour 4 solutions de même coût ou de coût proche de celui de la solution analysée pour le scénario équilibré (voir Figure 23) : pour des coûts totaux de solution dans un intervalle réduit [12620, 12670], les nombres

d'arbres varient entre 12 et 29, avec des agencements donnant lieu à des configurations d'unités spatiales bien distinctes.

III.4.2 - La preuve de concept est-elle faite ?

III.4.2.1 Valeur démonstrative du modèle

Le modèle construit repose sur la localisation de zones où peuvent potentiellement se produire des interactions agroforestières : zones d'interception de la lumière par les arbres, zones d'extension des racines. L'étendue de ces zones varie au cours du temps, en fonction de l'évolution de la morphologie des arbres. Une fois ces zones déterminées dans le modèle, la construction d'un modèle de système agroforestier consiste en la définition des interactions, positives ou négatives, se produisant dans ces zones. Pour la preuve de concept axée sur les vergers maraîchers, il a été choisi de modéliser les interactions liées à la perte de rayonnement solaire sous les arbres, ainsi que celles liées au partage et à la compétition pour l'eau : cette modélisation d'interactions s'est faite de façon simple, à l'aide de fonctions de coût binaires, et s'est révélée efficace par l'obtention de solutions satisfaisant bien les critères modélisés. En effet, en réponse à la question initiale de conception « Comment agencer dans l'espace et dans le temps des cultures fruitières et maraîchères sur une parcelle, en tirant le meilleur parti des interactions agroforestières, tout en maintenant quantité et mixité des productions à moyen et long termes ? », les solutions analysées au paragraphe III.3.3.3 sont bien des propositions d'agencement d'arbres avec des successions maraîchères respectant des contraintes de quantité et mixité, et qui sont positionnées en intégrant les bénéfices ou préjudices attendus des interactions avec les arbres représentées dans le modèle : les résultats des scénarios accordant plus d'importance à un critère qu'à un autre démontrent la recherche du respect de ces critères, qui correspond à « tirer le meilleur parti des interactions agroforestières ».

Le modèle de preuve de concept construit ici démontre qu'il est possible d'utiliser le formalisme CSP pour représenter des interactions agroforestières, ainsi qu'une majeure partie des règles de fonctionnement du verger maraîcher, à savoir l'espacement des arbres, leur évolution temporelle, la saisonnalité et la mixité des cultures maraîchères. Il n'a par contre pas permis de démontrer une intégration efficace dans ce même modèle de contraintes représentant des règles de non-dispersion du maraîchage et d'équilibre mensuel des temps de travaux. Cette démonstration n'a pas pu être faite à cause de limitations de l'outil de résolution *toulbar2* disponible pour cette étude : il n'a pas été possible de trancher si ces limitations sont uniquement matérielles (puissance de calcul du processeur, taille de mémoire), ou si elles sont algorithmiques, liées aux heuristiques de recherche de solutions implémentées dans l'outil, ou encore si elles sont liées à la structure du modèle de preuve de concept lui-même, qui pourrait perturber la recherche efficace de solutions.

III.4.2.2 Qualité des résultats

Les propositions d'agencement d'arbres et de cultures obtenues avec le modèle de preuve de concept prennent bien en compte le sous-ensemble d'interactions incluses dans le modèle. Ce sous-ensemble ne représente cependant pas complètement la réalité agronomique du verger maraîcher : il y manque des interactions connues mais exclues volontairement de la preuve de concept, par similitude avec d'autres interactions (par exemple : compétition et partage de l'azote, similaire aux compétition et partage de l'eau), il y manque des interactions mal connues (par exemple : les régulations naturelles entre espèces), les interactions représentées ne sont pas quantifiées précisément (par exemple : délimitation des zones d'exploration racinaire avec la granularité d'une unité spatiale du modèle ; estimation qualitative, et non quantitative, des effets de la perte de rayonnement solaire sur les cultures), les espèces maraîchères et fruitières sont représentées de façon générique, l'environnement pédoclimatique n'est pas considéré (types de sols, parcelles environnantes). Il en résulte que les solutions issues du modèle ne sont pas utilisables telles quelles avec des exploitants, qui ne pourraient pas adhérer à des propositions d'agencement trop divergentes de leur expérience du terrain.

Le modèle dans son état actuel ne peut pas être un outil expert de propositions d'agencements réels de vergers maraîchers. Il est par contre une structure de représentation des interactions entre arbres et cultures qui pourrait être utilisée comme outil d'analyse d'impact de combinaisons pondérées d'interactions agroforestières sur les agencements des parcelles : l'outil permet par exemple de visualiser que si la compétition entre arbres et cultures est considérée comme un risque important pour le fonctionnement du système, il est préférable d'organiser les arbres de sorte que des zones hors de portée des racines des arbres soient préservées pour les cultures compétitrices, ce qui peut s'obtenir avec des regroupements d'arbres suffisamment éloignés ; à l'inverse, si l'objectif du système est de tirer le meilleur profit du partage potentiel des ressources du sol, il faut un nombre d'arbres plus important, distribués partout sur la parcelle, pour obtenir une couverture racinaire maximale le plus rapidement possible.

Les arguments précédents vont dans le sens d'une validation partielle de la preuve de concept, avec des limites, qui devront faire l'objet d'analyses complémentaires si décision est prise de poursuivre la construction du modèle complet.

III.4.3 - Options pour un modèle d'aide à la conception de vergers maraîchers

La première option est de compléter le cœur de modèle construit pour la preuve de concept, en ajoutant des interactions entre espèces cultivées, arbres et/ou cultures, sous la forme de nouveaux jeux de contraintes : il sera alors possible d'instancier divers modèles en combinant différemment les jeux de contraintes disponibles selon les besoins d'une conception. Les ajouts d'interactions pourront se faire sur la base des caractéristiques des espèces collectées dans les « fiches espèces », complétées par la collecte de nouvelles informations agronomiques sur des sites d'expérimentations agroforestières. La principale difficulté lors de ces collectes sera d'isoler des effets d'interactions individuelles à des fins de modélisation, avec des dispositifs de collecte précis au niveau des couples d'espèces.

Une seconde option, non exclusive de la précédente, est l'ajout de valeurs de variables dans le modèle CSP, c'est-à-dire l'ajout de nouvelles espèces, par exemple pour différencier des espèces fruitières. Il faudra dans ce cas être vigilant que chaque nouvelle valeur doit avoir une typicité, et se distinguer des autres valeurs par au moins un coût dans une interaction. Ceci va à l'encontre d'ajout d'espèces maraîchères variées dans le seul but de modéliser des rotations réalistes : la modélisation de rotation sur une unité spatiale selon sa typologie (ombre/soleil, racines ou pas) doit faire l'objet d'un autre type de modélisation, comme cela est fait par exemple avec l'outil Rotat (Dogliotti et al., 2003).

La complexification progressive du modèle en termes de variables et/ou contraintes va mener à atteindre les limites du solveur *toulbar2*, qui ne sera plus en mesure de trouver de solutions aux problèmes posés. Il est difficile de prévoir les capacités exactes de l'outil à absorber des ajouts, car tout dépend de la structure de ces ajouts, et de leur influence sur les recherches de solutions. Par exemple, l'ajout de contraintes n'est pas nécessairement un frein à la bonne exécution du solveur : il peut au contraire dans certains cas permettre d'accélérer ses recherches par restriction des solutions possibles. A l'inverse, l'expansion du domaine des valeurs de variables peut être pénalisante si elle a pour effet d'augmenter le nombre de choix possibles pour l'affectation d'une unité spatiale.

Quand les limites du solveur *toulbar2* seront atteintes, il faudra envisager de faire évoluer ce solveur, ou essayer de reformuler le modèle sous d'autres formalismes, comme par exemple la programmation linéaire en nombres entiers (ILP pour Integer Linear Programming). Le modèle reformulé pourrait alors être résolu avec d'autres types de solveurs, qui implémentent des heuristiques de recherche de solutions différentes. Ceci a été fait précédemment avec succès pour le modèle WCSP de résolution d'un problème d'allocation de grandes cultures décrit dans (Akplogan et al., 2013), montrant de meilleures performances de l'approche ILP par rapport à *toulbar2* pour les modèles plus volumineux.

IV - Conclusion

Ce travail sur l'utilité des problèmes de satisfaction de contraintes pour la conception de vergers maraîchers a d'abord permis de décrire une structure de modèle de vergers maraîchers, s'appuyant sur la constitution d'une base de connaissances incluant les interactions et règles de fonctionnement qui sont propres à ces systèmes agroforestiers, ainsi que les caractéristiques d'espèces fruitières et maraîchères entrant en jeu dans ces interactions et règles. Cette base de connaissances n'est pas spécifique à une modélisation sous formalisme CSP, et pourrait être utilisée pour construire d'autres types de modèles. Dans le cadre du stage, la base a servi à construire une preuve de concept partielle que des modèles de type CSP pourraient être mis en œuvre dans les phases amont de conception de vergers maraîchers, moyennant des compléments au modèle réduit disponible aujourd'hui, qui n'englobe pas toute la complexité agronomique des systèmes étudiés. Dans la perspective de démarches de co-conception entre chercheurs et exploitants, l'avantage majeur des modèles de type CSP est leur potentiel d'évolutivité par simple ajout de nouvelles contraintes. Celles-ci peuvent soit représenter de nouvelles interactions, résultant alors en un modèle plus complet et plus complexe, soit représenter des choix de conception, restreignant les solutions possibles de façon itérative au fil de la maturation du processus de décision.

Pour aboutir à un modèle de valeur agronomique reconnue par les experts, un approfondissement de la compréhension des systèmes agroforestiers horticoles est d'abord nécessaire : mécanismes de régulations naturelles entre espèces, utilisation des ressources trophiques du sol par les arbres et cultures, pratiques permettant un développement racinaire des arbres fruitiers en profondeur et latéralement. Les questionnements sur ces thèmes sont récurrents dans les ateliers de conception de vergers maraîchers (par exemple, dans le cadre des projets Durette et TAB) : il est primordial de trouver des éléments de réponse à ces questions dans les années à venir, en s'appuyant sur des travaux de recherche agronomique.

En parallèle, une étude de stratégie de modélisation doit être envisagée afin d'évaluer s'il est pertinent de poursuivre la construction d'un modèle CSP intégrant toute la complexité agronomique, ou s'il est préférable de mettre en œuvre d'autres formalismes, tout en gardant les propriétés recherchées des modèles CSP : flexibilité de l'ajout de contraintes, proposition de solutions multiples équivalentes, état initial du système non connu. Dans le cas de stratégie CSP, l'étude doit analyser comment faire évoluer l'outil *toulbar2* disponible, et/ou définir de nouveaux algorithmes de résolution, mieux adaptés à la modélisation des systèmes agroforestiers.

Les travaux scientifiques sur les vergers maraîchers ne font que débuter, et sont amenés à se développer, avec une partie recherche expérimentale sur les interactions entre arbres et cultures, afin d'apporter des connaissances qui font défaut, et une partie recherche d'outils d'accompagnement pour les porteurs de projets, dont les modèles font partie.

V - Références bibliographiques

- AKPLOGAN, M., DE GIVRY, S., MÉTIVIER, J.P., QUESNEL, G., JOANNON, A. et GARCIA, F., 2013. Solving the Crop Allocation Problem using Hard and Soft Constraints. In : *RAIRO Operations Research*. 2013. Vol. 47, n° 02, p. 151-172. DOI 10.1051/ro/2013032.
- ANNETS, J.E. et AUDSLEY, E., 2002. Multiple objective linear programming for environmental farm planning. In : *Journal of the Operational Research Society*. 2002. Vol. 53, n° 9, p. 933-943.
- ARGOUARC'H, J., 2005. *Les cultures légumières en agriculture biologique - Fiches technico-économiques des principaux légumes - Culture de plein champ et sous abri* [en ligne]. CFPPA Rennes - Le Rheu (35). [Consulté le 23 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.formation-continue.theodore-monod.educagri.fr/fileadmin/user_upload/pdf/fiches_maraichage_Joseph/Fiches_legumes_JA_2010.pdf.
- ATKINSON, D., 1983. The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. In : *Plant and Soil*. 1983. Vol. 71, n° 1-3, p. 23-35.
- BISWAS, A. et PAL, B.B., 2005. Application of fuzzy goal programming technique to land use planning in agricultural system. In : *Omega*. octobre 2005. Vol. 33, n° 5, p. 391-398. DOI 10.1016/j.omega.2004.07.003.
- BLE et CIVAM PAYS BASQUE, 2011. *La conduite de l'irrigation en maraîchage bio* [en ligne]. Bio d'Aquitaine. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.bio-aquitaine.com/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,559/.
- BRUNO, J.F., STACHOWICZ, J.J. et BERTNESS, M.D., 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. In : *Trends in Ecology & Evolution*. mars 2003. Vol. 18, n° 3, p. 119-125. DOI 10.1016/S0169-5347(02)00045-9.
- BURGESS, S.S.O., ADAMS, M.A., TURNER, N.C. et ONG, C.K., 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. In : *Oecologia*. 1998. Vol. 115, n° 3, p. 306-311.
- CA RHÔNE-ALPES, 2009. *Références technico-économiques - Légumes biologiques* [en ligne]. Chambre d'agriculture Rhône-Alpes. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : [http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08861/\\$File/Fiches_AB-Tek-eco_legumes_BIO.pdf](http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08861/$File/Fiches_AB-Tek-eco_legumes_BIO.pdf).
- CA47, 2010. *Conduite du pommier en agriculture biologique en Lot-et-Garonne* [en ligne]. Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.agribio-aquitaine.fr/component/jdownloads/finish/13-arboriculture/25-guide-technique-conduite-du-pommier-en-ab-en-47-chambre-d-agriculture-47?Itemid=0>.
- CA82, 2010. *Chiffres repères pour différentes activités agricoles développées sur le Tarn et Garonne* [en ligne]. Chambre d'agriculture du Tarn-et-Garonne. [Consulté le 24 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.agri82.fr/images/stories/2012/arbo_2012/technicoeco_arbo.pdf.
- CALLAWAY, R.M., 1995. Positive interactions among plants. In : *The Botanical Review*. 1995. Vol. 61, n° 4, p. 306-349.

- CANNELL, M.G.R., VAN NOORDWIJK, M. et ONG, C.K., 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. In : *Agroforestry Systems*. 1 avril 1996. Vol. 34, n° 1, p. 27-31. DOI 10.1007/BF00129630.
- COMMOD, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. In : *Natures Sciences Sociétés*. 2005. Vol. 13, n° 2, p. 165-168.
- COULON, F., DUPRAZ, C., LIAGRE, F. et POINTEREAU, P., 2000. Lettre de Commande n°LC176/00 du 21/07/00 : *Etude des pratiques agroforestières associant des arbres fruitiers de haute tige à des cultures ou des pâtures*. Ministère de l'Aménagement et du Territoire et de l'Environnement - Direction de la Nature et des Paysages - Sous-Direction des Espaces Naturels.
- CTIFL, 2012. *Eléments de décision pour une fertilisation raisonnée en azote sur les cultures fruitières et légumières* [en ligne]. CTIFL. [Consulté le 29 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.fruits-et-legumes.net/TecnicEnVerger/Elements_Decision_Ferti_Raisonnee_Azote_Cult_FL.pdf.
- DAUZAT, J. et EROY, M.N., 1997. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. In : *European Journal of Agronomy*. septembre 1997. Vol. 7, n° 1-3, p. 63-74. DOI 10.1016/S1161-0301(97)00029-4.
- DENG, T., WANG, J., GAO, Y. et CHEN, X., 2010. Effect of allelochemicals of tomato on seedling growth of some vegetables. In : *Guizhou Agricultural Sciences*. 2010. n° 8, p. 43-44, 47.
- DOGLIOTTI, S., ROSSING, W.A.H. et VAN ITTERSUM, M.K., 2003. Rotat, a tool for systematically generating crop rotations. In : *European Journal of Agronomy*. mai 2003. Vol. 19, n° 2, p. 239-250. DOI 10.1016/S1161-0301(02)00047-3.
- DORÉ, T., MAKOWSKI, D., MALÉZIEUX, E., MUNIER-JOLAIN, N., TCHAMITCHIAN, M. et TITTONELL, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. In : *European Journal of Agronomy*. mai 2011. Vol. 34, n° 4, p. 197-210. DOI 10.1016/j.eja.2011.02.006.
- DUPRAZ, C., 1994. Les associations d'arbres et de cultures intercalaires annuelles sous climat tempéré. In : *Revue Forestière Française XLVI, no. spécial*. 1994. p. 72-83.
- DUPRAZ, C. et LIAGRE, F., 2011. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. 2ème éd. Paris : France Agricole. ISBN 978-28-555-7205-5, 28-555-7205-3.
- DUPRAZ, C. et TALBOT, G., 2012. Evidences and explanations for the unexpected high productivity of improved temperate agroforestry systems. In : *First EURAF conference* [en ligne]. INRA Montpellier (34). 9 octobre 2012. [Consulté le 24 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://euraf.isa.utl.pt/sites/default/files/pub/docs/14_20_dupraz.pdf.
- EICHHORN, M. P., PARIS, P., HERZOG, F., INCOLL, L. D., LIAGRE, F., MANTZANAS, K., MAYUS, M., MORENO, G., PAPANASTASIS, V. P., PILBEAM, D. J., PISANELLI, A. et DUPRAZ, C., 2006. Silvoarable Systems in Europe – Past, Present and Future Prospects. In : *Agroforestry Systems*. 1 avril 2006. Vol. 67, n° 1, p. 29-50. DOI 10.1007/s10457-005-1111-7.
- ETIENNE, M. et RAPEY, H., 1998. Simulating integration of agroforestry into livestock farmers 'projects in France. In : *Agroforestry systems*. 1998. Vol. 43, n° 1-3, p. 257-272.
- GRCETA BASSE DURANCE, 2004. *Réussissez vos plantations de pommiers*.

- GRIFFITHS, J., PHILLIPS, D. S., COMPTON, S. G., WRIGHT, C. et INCOLL, L. D., 1998. Responses of slug numbers and slug damage to crops in a silvoarable agroforestry landscape. In : *Journal of applied ecology*. 1998. Vol. 35, n° 2, p. 252–260.
- HERZOG, F., 1998. Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe. In : *Agroforestry Systems*. 1 juillet 1998. Vol. 42, n° 1, p. 61–80. DOI 10.1023/A:1006152127824.
- HESTER, S.M. et CACHO, O., 2003. Modelling apple orchard systems. In : *Agricultural Systems*. août 2003. Vol. 77, n° 2, p. 137–154. DOI 10.1016/S0308-521X(02)00106-3.
- HUNTER, A. F. et AARSSSEN, L. W., 1988. Plants Helping Plants. In : *BioScience*. janvier 1988. Vol. 38, n° 1, p. 34–40. DOI 10.2307/1310644.
- INGAWALE, U. H., PRABU, T., MUNDE, V. M., KULKARNI, N. H. et MESHARAM, S. U., 2004. Economics of growing leafy vegetables in summer by using shade giving tall plants and spreading plants. In : *Haryana Journal of Horticultural Sciences*. 2004. Vol. 33, n° 3/4, p. 310–311.
- INRA, 2012. *Weighted Constraint Satisfaction Problem file format (wcsp)* [en ligne]. Toulouse. Département de Mathématique et Informatique appliquées. [Consulté le 23 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://costfunction.org/solver/cgi-bin/portal.py#tutorials::wcsp>.
- ITAB, 2005. *Les engrais verts en maraîchage biologique* [en ligne]. Institut technique de l'agriculture biologique. [Consulté le 5 juin 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_maraichage/ENGRAIS%20VERTS.pdf.
- ITAB, GRAB et BIO DE PROVENCE, 2012. *Vers un verger agroforestier* [en ligne]. Journées Techniques Nationales fruits, légumes et viticulture biologiques. [Consulté le 22 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.itab.asso.fr/downloads/actes3/actes-jt2012trans-arbo-viti2.pdf>.
- JOSE, S., GILLESPIE, A.R. et PALLARDY, S.G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. In : *Agroforestry Systems*. juillet 2004. Vol. 61-62, n° 1-3, p. 237–255. DOI 10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b.
- KAESER, A., SEREKE, F., DUX, D. et HERZOG, F., 2010. ART 725 : *Agroforesterie moderne en Suisse* [en ligne]. Station de recherche Agroscope. [Consulté le 23 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?aid=21764&lang=fr&p_id=22752.
- KIM, Y.S., 2001. Allelopathic effects of some volatile substances from the tomato plant. In : *Journal of Crop Protection*. 2001. Vol. 4, p. 313–321.
- LETERME, E., 2012a. *Douze éléments techniques pour la plantation d'un verger* [en ligne]. CIVAM PACA. [Consulté le 23 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.civampaca.org/upload/olkdlfsjnm.pdf>.
- LETERME, E., 2012b. *Valoriser le potentiel des haies par la production fruitière* [en ligne]. CIVAM PACA. [Consulté le 23 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.civampaca.org/upload/ekkuXcmftj.pdf>.
- MALÉZIEUX, E., CROZAT, Y., DUPRAZ, C., LAURANS, M., MAKOWSKI, D., OZIER-LAFONTAINE, H., RAPIDEL, B., TOURDONNET, S. et VALANTIN-MORISON, M., 2009.

- Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. mars 2009. Vol. 29, n° 1, p. 43-62. DOI 10.1051/agro:2007057.
- MIAH, M. M. U., RAHMAN, M. S., AMIN, M. H. A., RAYHAN, S. M. et HANIF, M. A., 2010. Performance of cabbage under multipurpose tree species as agroforestry system. In : *Bangladesh research publications journal*. 2010. Vol. 4, p. 76-81.
- MIAH, M.M.U., ISLAM, M.S., SIKDER, M.S.I., MONDOL, M.A.S. et HUDA, S., 2008. Performance of tomato under Ghoraneem and Sissoo based agroforestry systems. In : *Journal of Innovation and Development Strategy*. 2008. Vol. 2, p. 39-42.
- NEWMAN, S. M., 1986. A Pear and Vegetable Interculture System: Land Equivalent Ratio, Light Use Efficiency and Productivity. In : *Experimental Agriculture*. 1986. Vol. 22, n° 04, p. 383-392. DOI 10.1017/S0014479700014630.
- NISSEN, T. M., MIDMORE, D. J. et CABRERA, M. L., 1999. Aboveground and belowground competition between intercropped cabbage and young Eucalyptus torelliana. In : *Agroforestry Systems*. 1999. Vol. 46, n° 1, p. 83-93. DOI 10.1023/a:1006261627857.
- OUMA, G. et JERUTO, P., 2010. Sustainable horticultural crop production through intercropping: the case of fruits and vegetable crops: a review. In : *Agriculture and Biology Journal of North America*. 2010. Vol. 1, n° 5, p. 1098-1105. DOI 10.5251/abjna.2010.1.5.1098.1105.
- PALMER, J. W., 1977. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. In : *Journal of Applied Ecology*. 1977. p. 601-614.
- PLÉNET, D., SIMON, S., VERCAMBRE, G. et LESCOURRET, F., 2010. Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits. In : *Innovations agronomiques*. 2010. Vol. 9, p. 85-105.
- PORTAS, C.A.M., 1973. Development of root systems during the growth of some vegetable crops. In : *Plant and Soil*. 1 décembre 1973. Vol. 39, n° 3, p. 507-518. DOI 10.1007/BF00264169.
- SAUTEREAU, N., GENIAUX, G., BELLON, S., PETITGENET, M. et LEPOUTRE, J., 2010. Quantity versus quality and profit versus values ? Do these inherent tensions inevitably play in organic farming ? In : *Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food*. Montpellier, France : Cirad-Inra-SupAgro. 2010. p. 19 p.
- SCHROTH, G., 1998. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. In : *Agroforestry Systems*. 1 octobre 1998. Vol. 43, n° 1-3, p. 5-34. DOI 10.1023/A:1026443018920.
- SIMON, S., BOUVIER, J.C., DEBRAS, J.F. et SAUPHANOR, B., 2010. Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. mars 2010. Vol. 30, n° 1, p. 139-152. DOI 10.1051/agro/2009013.
- SMITH, J., PEARCE, B.D. et WOLFE, M.S., 2013. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? In : *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2013. Vol. 28, n° 01, p. 80-92. DOI 10.1017/S1742170511000585.
- TRENBATH, B. R., 1999. Multispecies cropping systems in India: Predictions of their productivity, stability, resilience and ecological sustainability. In : *Agroforestry Systems*. 1 mars 1999. Vol. 45, n° 1-3, p. 81-107. DOI 10.1023/A:1006285319817.

VALLI, V.J., BRYAN, H.H., YOUNG, H.W. et DAVIS, D.R., 1965. The effect of shade on the bioclimate and production of vegetable crops. In : *Florida state horticultural society*. 1965. Vol. 78, p. 95-101.

VERCAMBRE, G., PAGÈS, L., DOUSSAN, C. et HABIB, R., 2003. Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modelling approach. In : *Plant and Soil*. 2003. Vol. 251, n° 1, p. 1-11.

WEAVER, J.E. et BRUNER, W.E., 1927. *Root development of vegetable crops*. New-York : McGraw-Hill Book Company.

WOLFF, X.Y. et COLTMAN, R.R., 1990. Productivity of eight leafy vegetable crops grown under shade in Hawaii. In : *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1990. Vol. 115, n° 1, p. 182-188.

YOUNG, H.W., 1961. Production of spring vegetables under shade. In : *Florida state horticultural society*. 1961. Vol. 74, p. 209-216.

VI - Annexes

Annexe 1 – Exemples de fiches espèces	1
Annexe 2 – Construction du modèle WCSP	17
Annexe 3 – Options d'exécution des modèles	19
Annexe 4 – Caractéristiques des solutions analysées	21
Annexe 5 – Détail des solutions analysées	23

Annexe 1 – Exemples de fiches espèces

Cette annexe présente deux exemples de « fiches espèces » élaborées lors de la construction de la base de connaissances pour le modèle de vergers maraîchers : une fiche d'espèce fruitière, le pommier, et une fiche d'espèce maraîchère, la tomate.

Pommier

Classification

Famille botanique : famille des Rosacées, sous-famille des Maloïdées, genre *Malus*

Type de fruits : fruits à pépins

Système racinaire

Profondeur potentielle : jusqu'à plusieurs mètres à maturité (10 ans), selon les porte-greffes, les choix de conduite des jeunes arbres (compétition, fertilisation, irrigation), et la profondeur du sol atteignable par les racines.

Etagement latéral potentiel : dépend des types de sol, du positionnement du dispositif d'irrigation, des choix de conduite, de l'écartement avec les arbres voisins. Si les conditions s'y prêtent, la croissance latérale peut atteindre 1m par an dans les premières années de l'arbre.

Sol

Travail du sol :

- Avant plantation : installation d'un précédent cultural un an avant plantation, puis travail profond pour fissurer le sol en profondeur (sous-solage), et ameublissement en surface pour faciliter la reprise.
- Ensuite : travail du sol annuel recommandé, à faible profondeur pour les jeunes arbres, plus profondément (sous-solage) pour les arbres matures ; ce travail a pour effet de supprimer les racines superficielles, et ainsi stimuler le développement des racines en profondeur. Le travail du sol est par ailleurs indispensable pour lutter contre le campagnol dans les zones où il est présent.

Couverture du sol :

- Plantations et arbres jeunes (< 4ans) : enherbement permanent déconseillé pour des raisons de concurrences hydriques et minérales qui risquent de ralentir la croissance des arbres ; par contre, ces concurrences peuvent être bénéfiques à un développement racinaire plus profond.
- Arbres matures : enherbement permanent modéré peu préjudiciable sur des arbres de bonne vigueur, améliorant même la nutrition phosphatée, potassique et ferrique ; des stress trop importants peuvent toutefois constituer un facteur d'alternance.

Conditions climatiques

Température :

- Résiste jusqu'à -30°C.
- Période de froid nécessaire pour une bonne reprise de végétation au printemps.

Lumière : Bon ensoleillement favorable à la coloration des fruits.

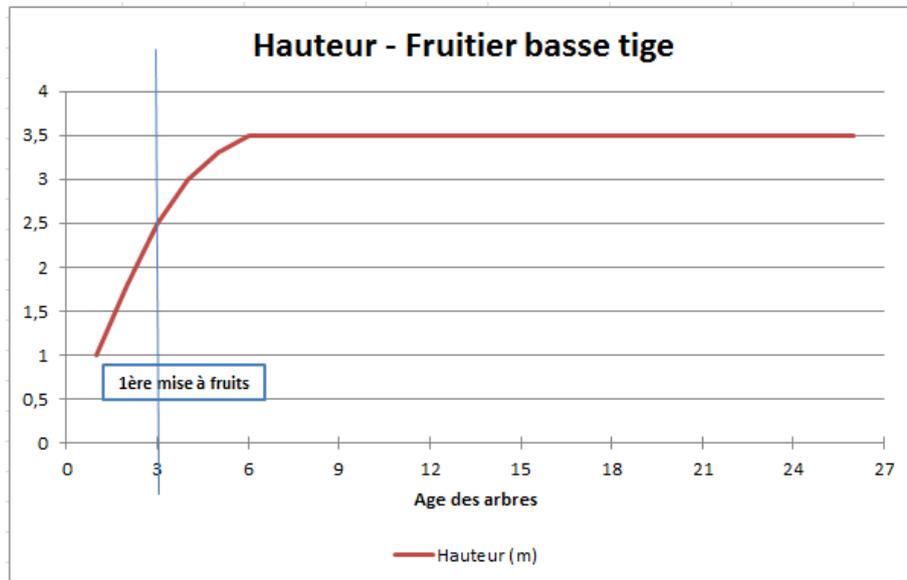
Humidité/Sécheresse :

- Un déficit hydrique important pénalise les développements végétatifs et racinaires, ainsi que la production de fruits ; par contre un déficit hydrique faible à modéré permet de limiter le développement des maladies des fruits.
- Un excès d'eau peut entraîner l'asphyxie des racines, et une croissance végétative excessive au détriment des fruits.

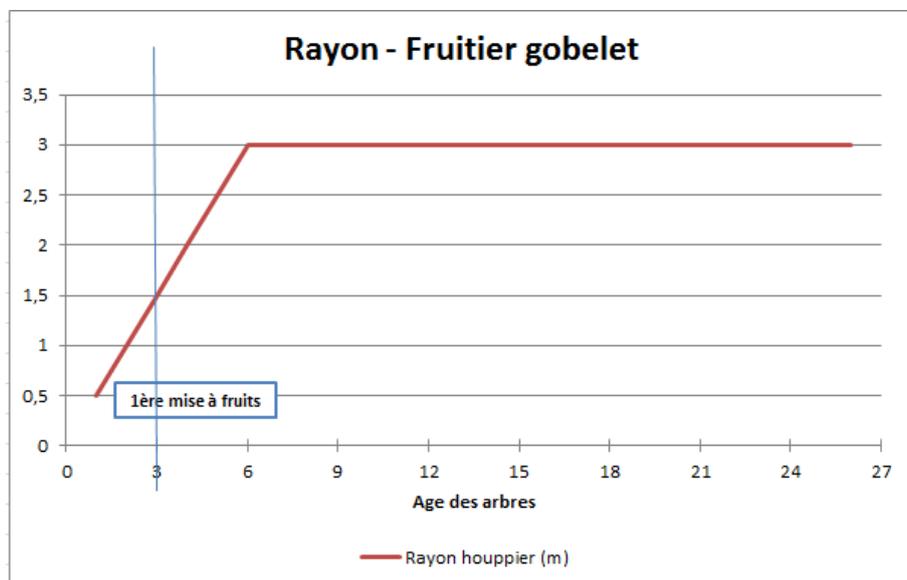
Morphologie

Forme : La forme gobelet non palissée est la plus pratiquée, à la fois pour des raisons sanitaires (meilleure aération), et pour la qualité des fruits (meilleure répartition de la lumière).

Hauteur : Pour des raisons de mécanisation de la récolte, la hauteur maximale est entre 3,5 et 4 m. Des pommiers de hauteur plus importante peuvent se trouver dans les exploitations cidricoles, où les fruits sont ramassés au sol.



(Comm. Perso. Arnaud Dufils)



(Hypothèse de croissance linéaire à confirmer)

Mobilisation de nutriments

Exportations N-P₂O₅-K₂O :

(Données pour les vergers en monoculture - Rdt = rendement estimé en T/ha)

	N – kg/ha (croissance)	P ₂ O ₅ – kg/ha (système racinaire)	K ₂ O – kg/ha (fructification)
1 ^{ère} feuille	20		faible
2 ^{ème} feuille	40		faible
3 ^{ème} feuille	80 + 0,6*Rdt	1*Rdt	2*Rdt
Production			

Dynamique des prélèvements :

- Azote : du stade B à la pleine floraison (début du printemps), de la nouaison au basculement (été), et après la récolte (octobre).
- Phosphore : du stade B à la pleine floraison, et après la récolte.
- Potasse : de la nouaison au basculement, et un peu après récolte.

Calendrier de fertilisation :

- Engrais organique NP en fin d'hiver.
- Engrais NK en mai.
- Amendement NPK en fin d'été.
- Pas d'apport tardif d'engrais qui serait lixivié par les pluies d'automne.

Cycles phénologiques

Présence de feuilles : avril à septembre.

Floraison : avril.

Maturité des fruits :

- Variétés précoces (Akane) : fin juillet.
- Variétés semi-précoces (Melrose) : début septembre.
- Variétés tardives (Juliet, Chouquette) : mi-octobre.

Temps de travaux

Après plantation, avant 1^{ère} mise à fruits

Hypothèse : 80 arbres/ha

h/ha	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	aoû	sep	oct	nov	déc
Fertilisation manuelle			1,4							1,4		
Travail du sol										1	1	
Irrigation		6	6	6	6	6	6	6	6		6	6
Désherbage	6,7	6,7	6,7							6,7	6,7	6,7
Gestion couvert				3	3	3	3	3	3			
Gestion maladies	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Gestion ravageurs	2,1	2,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Taille de formation	2,7	2,7	2,7								2,7	2,7
Gestion des fruits				2,2	2,2	2,2						
TOTAL	17,5	23,5	24,4	18,8	18,8	18,8	16,6	16,6	16,6	16,7	24,0	23,0

(Données ARDI – Durette)

Total = 235 h/ha/an

Phase de production

Hypothèses : 80 arbres/ha, variété tardive

h/ha	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
Fertilisation manuelle		1,4			1,4				1,4			
Sous-solage										1,5	1,5	
Irrigation			6	6	6	6	6	6	6	6		
Désherbage				6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7			
Gestion couvert				3		3	3					
Gestion maladies	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Gestion ravageurs	2,1	2,1	8,3	6,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Taille	2,7	2,7	2,7			4,4	4,4	4,4			2,7	2,7
Eclaircissage				4,4	4,4	4,4						
Récolte										20	20	
TOTAL	10,8	12,2	23,0	32,7	26,1	35,1	27,7	24,7	21,7	35,1	31,8	10,3

(Données ARDI – Durette)

Total = 291 h/ha/an

Hypothèses : 160 arbres/ha, variété tardive

h/ha	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
Fertilisation manuelle		2,7			2,7				2,7			
Sous-solage										1,5	1,5	
Irrigation			12	12	12	12	12	12	12	12		
Désherbage				13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3			
Gestion couvert				3		3	3					
Gestion maladies	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
Gestion ravageurs	2,1	2,1	15	6,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Taille	2,7	2,7	2,7			4,4	4,4	4,4			2,7	2,7
Eclaircissage				8,9	8,9	8,9						
Récolte										27	27	
TOTAL	18,1	20,8	43,0	57,1	51,8	56,5	47,6	44,6	42,9	55,4	46,1	17,6

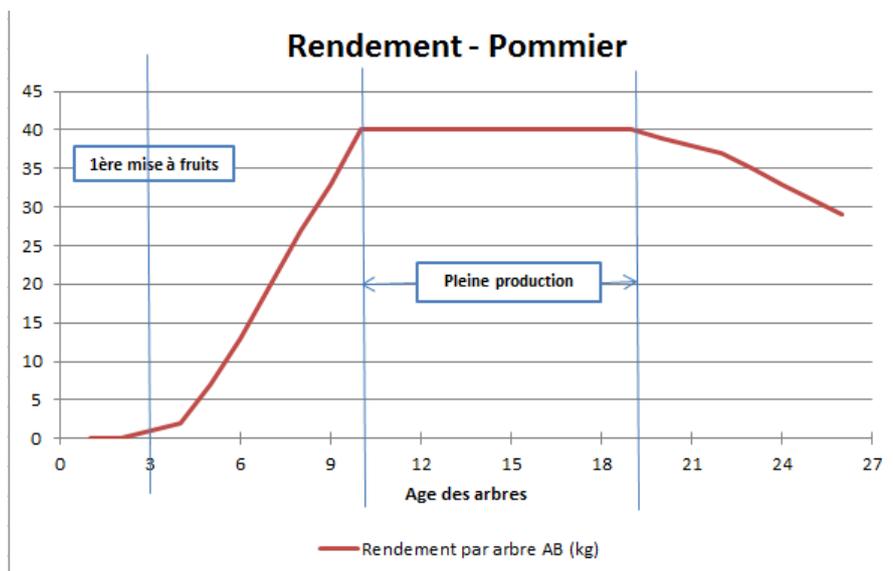
(Données ARDI – Durette)

Total = 501 h/ha/an

Rendements attendus

Rendement moyen AB :

- En tenant compte des risques d'alternance, le rendement moyen annuel en monoculture AB est 22 T/ha (données CA Rhône-Alpes).
- En se plaçant à l'échelle de l'arbre, le rendement estimé en pleine production est 40 kg/arbre (données GRAB, base C.Gaspari).
- La pleine production de l'arbre n'est pas atteinte dès la première mise à fruit, mais après plusieurs années de production ; autour de la 7^{ème} ou 8^{ème} feuille pour un porte-greffe vigoureux de type M7. Ensuite la pleine production est stable jusqu'au début de la sénescence de l'arbre, qui entraîne une baisse progressive de production, autour de 20 ans pour les pommiers.



(données GRAB, base C.Gaspari)

Ravageurs

Ravageurs	Facteurs aggravants	Facteurs améliorants	Calendrier	Lutte AB
Puceron cendré du pommier (<i>Dysaphis plantaginea</i>)	Gourmands très vigoureux. Excès d'azote.		Ponte des œufs dans les bourgeons à l'automne. Ecllosion au démarrage de la végétation. Hôte secondaire : le plantain, de juin à septembre.	Variétés résistantes. Application d'argile calcinée sur les arbres après récolte. Auxiliaires : syrphes, chrysopes, cécidomyies, coccinelles.
Carpocapse (<i>Cydia pomonella</i>)		Présence de prédateurs (oiseaux, chauve-souris).	Premiers papillons courant avril, qui pondent en mai-juin. Seconde génération de papillons en juillet-août, causant des dégâts sur les fruits. Hibernation sous forme de larve dans le sol ou les écorces.	Réduction de la population de larves hivernantes. Elimination hors du verger des fruits piqués.
Campagnols	Arbres jeunes et/ou peu vigoureux			Travail du sol. Ramassage des fruits tombés au sol.

Maladies

Maladies	Facteurs aggravants	Facteurs améliorants	Calendrier	Lutte AB
Tavelure (<i>Venturia inaequalis</i>)	Conditions humides (pluie) et température entre 7 et 25 °C.	Bonne aération des arbres. Faibles densités. Vigueur limitée.	Hibernation dans les feuilles au sol. Contaminations primaires en avril-mai sous l'effet des pluies.	Variétés résistantes. Enfouissement ou broyage fin des feuilles.
Oïdium (<i>Podosphaera leucotricha</i>)	Alternance de temps sec et venteux, puis humide. Champignon de stress hydrique. Printemps froids.		Hibernation dans les bourgeons sous forme de mycélium. Contaminations surtout au printemps.	Variétés résistantes. Elimination des rameaux et jeunes pousses contaminées.

Régulations naturelles

Effets allélopathiques sur d'autres espèces

Effets sur les ravageurs et maladies d'autres espèces (hôte d'auxiliaires, effets répulsifs ou attractifs)

Bénéfices observés de la proximité d'autres espèces

Synthèse calendaire

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Travaux (h/ha) 80 arbres/ha	11	12	23	33	27	35	28	25	22	35	32	10
	Taille d'hiver			Eclaircissage			Taille en vert				Taille d'hiver	
	Entretien des parcelles											
	Gestion des ravageurs et maladies											
Prélèvements Eau					Eau							
Prélèvements NPK												NPK
Fertilisation		NP		NP		NK			(NPK)			
Ravageurs	Campagnols											
				Carpocapse								
				Pucerons cendrés								
Maladies			Tavelure									
				Oïdium								

Bibliographie

CA RHÔNE-ALPES, 2011. *Le pommier en AB* [en ligne]. Chambre d'agriculture Rhône-Alpes. [Consulté le 28 mai 2013]. Disponible à l'adresse : [http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08857/\\$File/Fiches_AB-pommier.pdf](http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08857/$File/Fiches_AB-pommier.pdf).

CA47, 2010. *Conduite du pommier en agriculture biologique en Lot-et-Garonne* [en ligne]. Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.agribio-aquitaine.fr/component/jdownloads/finish/13-arboriculture/25-guide-technique-conduite-du-pommier-en-ab-en-47-chambre-d-agriculture-47?Itemid=0>.

CA84, 2008. *Pomme Juliet - Guide de production* [en ligne]. Chambre d'Agriculture du Vaucluse. [Consulté le 28 mai 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.pomme-juliet.com/pdf/guide_production_juliet.pdf.

CTIFL, 2012. *Éléments de décision pour une fertilisation raisonnée en azote sur les cultures fruitières et légumières* [en ligne]. CTIFL. [Consulté le 29 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.fruits-et-legumes.net/TecnicEnVerger/Elements_Decision_Ferti_Raisonnee_Azote_Cult_FL.pdf.

GAZEAU, Gérard, 2012. *Fertilisation en arboriculture* [en ligne]. Chambre d'Agriculture du Vaucluse. [Consulté le 7 juin 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.cas-asso.com/uploads/rte/File/DossiersPresse/Les%20sols%20vivants%20Bio/6_Ferti_Arbo.pdf.

ITAB et GRAB, 2002. *Produire des fruits en agriculture biologique*. Paris : ITAB, Institut technique de l'agriculture biologique. ISBN 2951585543 9782951585546.

LESPINASSE, Jean-Marie, 2005. *De la taille à la conduite des arbres fruitiers*. Rodez : Ed. du Rouergue. ISBN 2841566366 9782841566365.

Tomate

Classification

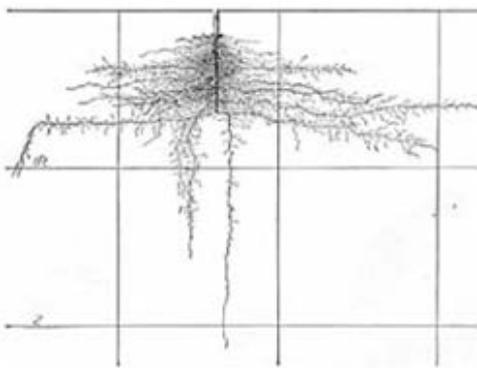
Famille botanique : Solanacées

Type de légume : légume fruit de cycle long, très gourmand en eau et nutriments.

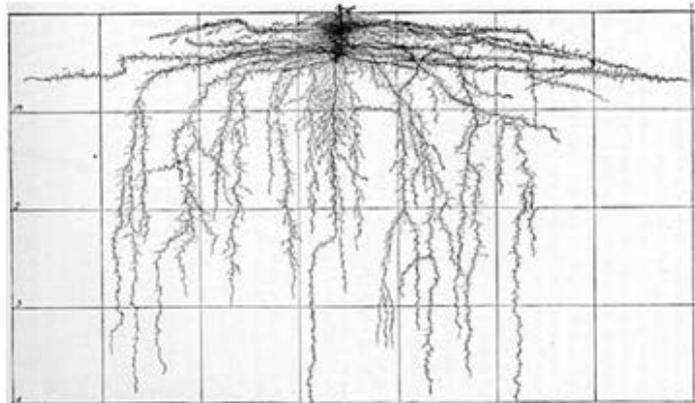
Système racinaire

Profondeur potentielle :

Tomate - 4 semaines



Tomate - 8 semaines



1 graduation = 1 pied (environ 30 cm)

Sol

Type de sol favorable : sablo-sableux ou limoneux, plutôt acide (PH entre 6 et 7), bien drainant.

Type de sol à éviter : culture peu exigeante sur le type de sol.

Travail du sol : sol bien décompacté en profondeur (sous-soleuse), avec travail superficiel pour ameublir.

Conditions climatiques

Température :

- Craint le gel.
- Optimum de température diurne à 25°C, avec une baisse optimale de 10°C la nuit.
- Optimum de température du sol entre 18 et 20°C.

Lumière :

- Zones ensoleillées, mais sensible aux insulations directes excessives (juillet à septembre), qui peuvent entraîner des brûlures sur les fruits.
- Une réduction des amplitudes thermiques jour-nuit en été pourrait permettre de limiter certaines détériorations des fruits (craquelures).

Humidité/Sécheresse :

- Peu de besoins en eau le premier mois après plantation, jusqu'à nouaison.
- Sensible à la sécheresse en période de production : les manques d'eau diminuent le calibre des fruits, et peuvent provoquer les nécroses apicales (« cul noir »).
- Ces nécroses apicales peuvent aussi être provoquées par des excès d'eau.

Rotation

Délai de retour : minimum 6-7 ans, voire 10 ans (souvent difficile d'éviter un retour de Solanacées avant 6-7 ans).

Effets précédent et suivant :

- Précédents favorables : salades, engrais vert, Alliacées, cultures n'épuisant pas le sol.
- Précédents défavorables : toutes les Solanacées (pomme de terre, aubergine, tomate), la luzerne qui laisse un excès d'azote défavorisant la fructification.

Mobilisation de nutriments

Exportations N-P₂O₅-K₂O : 300 – 100 – 600 kg/ha pour un rendement estimé de 100 T/ha

Dynamique des prélèvements :

- Dans le mois suivant la plantation, la tomate développe son système racinaire, et prélève peu de nutriments.
- Ensuite, les prélèvements de tous les nutriments sont importants jusqu'à la fin de la culture.
- Les excès d'azote provoquent une végétation excessive au détriment des fruits, ainsi qu'une plus grande sensibilité aux maladies et aux parasites.

Calendrier de fertilisation :

- Apport d'engrais organique NPK à minéralisation lente (fumure de fond), à la plantation.

Potentiel de lixiviation (dates, facteurs) :

- Faible si fumure raisonnée à la plantation (sans excès).
- Risque accru si pluies abondantes dans le mois suivant la plantation, pendant lequel les plants ne prélèvent pas beaucoup.

Calendrier cultural

Dates plantation plein champ : à partir de mi-avril, quand les sols sont bien réchauffés, et que les gelées ne sont plus à craindre.

Durée semis-plant : environ 6 semaines (semis mi-mars pour plantation en mai).

Durée plantation-maturité : 70 jours pour les premiers fruits, jusqu'à 16 semaines.

Temps de travaux

h/1000 m ²	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept
Préparation sol		1					
Paillage/irrigation		2	1	1	1	1	1
Plantation/structure palissage			32				
Fertilisation		1					
Protection	1	1	1	1	1	1	1
Désherbage			1	1	1	1	
Palissage/taille/ébourgeonnage			20	20	20	20	
Récolte					50	50	50
TOTAL	1	5	55	23	73	73	52

(Données ARDI – Durette et (CA Rhône-Alpes, 2009))

Total = 282 h/1000 m²

Rendements attendus et valorisation

Rendement moyen AB

- Plantation : 1 à 2 plants/m²
- Récolte : 5 à 12 kg/m² (grande variabilité)

Valorisation sur les circuits longs (gros) et courts (paniers, vente directe)

- Détail : 1,6 à 4,3 euros/kg
- Gros : 0,4 à 2,3 euros/kg

Ravageurs

Ravageurs	Facteurs aggravants	Facteurs améliorants	Calendrier	Lutte AB
Noctuelles de la tomate (<i>Manestra oleracea</i> , <i>Chloridea armigera</i> , <i>Heliothis armigera</i>)	Conditions estivales. Sécheresse.	Précipitations. Aération.	Présence des adultes et pontes de mai à fin octobre. Dissémination par le vent et le vol des adultes Hibernation sous terre.	Pièges et auxiliaires.
Pucerons polyphages (<i>Macrosiphon euphorbiae</i> , <i>Myzus persicae</i>)	Conditions estivales. Sécheresse.		Hibernation sous forme d'œufs sur des hôtes pérennes (ex : adventices).	Elimination des résidus de culture. Lâchers d'auxiliaires.

Note : en plein champ, il n'y a généralement pas d'attaques de mineuses (*Tuta Absoluta*), ni d'aleurodes.

Maladies

Maladies	Facteurs aggravants	Facteurs améliorants	Calendrier	Lutte AB
Mildiou (<i>Phytophthora infestans</i>)	Excès d'humidité Vent et pluie. Températures entre 3 et 25 °C, mais surtout entre 16 et 22°C.	Temps de retour longs. Bonne aération. Atmosphère sèche et températures supérieures à 30°C.	Hibernation dans le sol après culture de pomme de terre ou tomate.	Elimination des déchets de culture. Rotation.
Alternariose (<i>Alternaria solani</i>)	Alternance de forte hygrométrie nocturne et de journées sèches. Vent et pluie.	Bonne aération.	Transmission par les semences. Hibernation à la surface du sol et dans les débris de culture.	Semences contrôlées. Elimination des déchets de culture. Rotation.
Maladie des racines liégeuses (corky roots) (<i>Pyrenochaeta lycopersici</i>)	Sols froids (<15°C) à la plantation.		Transmission par les semences. Potentiel de dispersion très limité.	Variétés résistantes. Elimination des déchets de culture. Rotation. Plantation en sol réchauffé. Désinfection des outils.

Régulations naturelles

Effets allélopathiques sur d'autres espèces

Effets sur les ravageurs et maladies d'autres espèces (hôte d'auxiliaires, effets répulsifs ou attractifs)

- Mildiou commun avec la pomme de terre.
- Pucerons communs avec la pomme de terre et le pêcher.

Bénéfiques observés de la proximité d'autres espèces

Synthèse calendaire

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	
Travaux (h/1000 m ²)			1	5	55	23	73	73	52				
				Préparation									
					Culture								
					Entretien des parcelles								
			Gestion des ravageurs et maladies										
Prélèvements Eau								Eau					
Prélèvements NPK								NPK					
Fertilisation					NPK								
Ravageurs						Noctuelles de la tomate							
						Pucerons							
Maladies					Mildiou				Mildiou				
				Corky roots									
				Alternarioses					Alternarioses				

Bibliographie

ARGOUARC'H, Joseph, 2005. Les cultures légumières en agriculture biologique - Fiches technico-économiques des principaux légumes - Culture de plein champ et sous abri [en ligne]. CFPPA Rennes - Le Rheu (35). [Consulté le 23 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.formation-continue.theodore-monod.educagri.fr/fileadmin/user_upload/pdf/fiches_maraichage_Joseph/Fiches_legumes_JA_2010.pdf.

BLE et CIVAM PAYS BASQUE, 2011. La conduite de l'irrigation en maraîchage bio [en ligne]. Bio d'Aquitaine. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.bio-aquitaine.com/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,559/.

CA RHÔNE-ALPES, 2009. Références technico-économiques - Légumes biologiques [en ligne]. Chambre d'agriculture Rhône-Alpes. [Consulté le 2 mai 2013]. Disponible à l'adresse : [http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08861/\\$File/Fiches_AB-Tek-eco_legumes_BIO.pdf](http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/08861/$File/Fiches_AB-Tek-eco_legumes_BIO.pdf).

CIVAMBIO 33, 2001. Fiche technique en AB - Tomate [en ligne]. CIVAMBIO Gironde. [Consulté le 3 juin 2013]. Disponible à l'adresse : <http://civambiogironde.chez-alice.fr/civambiogironde/Documentation/Fiches%20TK%20Maraichage/FT%20tomate.pdf>.

FRAB MIDI-PYRÉNÉES, 2012. Les fiches techniques légumes. In : [en ligne]. 6 août 2012. [Consulté le 18 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.biomidipyrenees.org/article-481-les-fiches-techniques-legumes>.

ITAB, 2002. Maladies et ravageurs de la tomate. In : Alter Agri. février 2002. n° 51, p. 12-13.

PÉRON, Jean-Yves, 2006. Références productions légumières. Paris : Lavoisier. ISBN 2910340481 9782910340483.

Annexe 2 – Construction du modèle WCSP

Le document qui suit décrit les choix de représentation des variables, domaines, interactions et règles de fonctionnement du verger maraîcher pour la construction du modèle au formalisme WCSP.

Construction du modèle WCSP

de verger maraîcher

Variables et domaines

Variables

L'ensemble χ est constitué des variables $x_{i,j,t}$ avec :

- $i \in \{0, \dots, 9\}$ représente la position de l'unité spatiale sur l'axe des abscisses.
- $j \in \{0, \dots, 9\}$ représente la position de l'unité spatiale sur l'axe des ordonnées.
- $t \in \{0, \dots, 8\}$ représente le pas de temps de modélisation, avec pour convention :
 - o $t=0$ représente la saison 4 (automne) de la période 1.
 - o $t=1$ représente la saison 1 (hiver) de la période 2.
 - o $t=2$ représente la saison 2 (printemps) de la période 2.
 - o $t=3$ représente la saison 3 (été) de la période 2.
 - o $t=4$ représente la saison 4 (automne) de la période 2.
 - o $t=5$ représente la saison 1 (hiver) de la période 3.
 - o $t=6$ représente la saison 2 (printemps) de la période 3.
 - o $t=7$ représente la saison 3 (été) de la période 3.
 - o $t=8$ représente la saison 4 (automne) de la période 3.

Dans le formalisme CSP, chaque variable doit être représentée par un index n unique, nombre entier commençant à 0. La convention suivante est choisie : $n = i + N*j + N^2*t$ avec $t =$ pas de temps (de 0 à l'horizon de modélisation) et $N =$ nombre de lignes et de colonnes d'unités spatiales, et donc $N^2 =$ nombre total d'unités spatiales de la parcelle.

Exemple pour $N=5$ aux instants $t=0$ et $t=2$:

0	1	2	3	4
5	6	7	8	9
10	11	12	13	14
15	16	17	18	19
20	21	22	23	24

Nord



50	51	52	53	54
55	56	57	58	59
60	61	62	63	64
65	66	67	68	69
70	71	72	73	74

Domaines

Le domaine d'une variable est l'ensemble des occupations de sol possibles sur l'unité spatiale représentée ; cet ensemble dépend de la saison à laquelle appartient la variable.

Les valeurs de variables suivantes sont communes à toutes les saisons :

- SO = sol nu
- ARF = arbre fruitier

A ces valeurs s'ajoutent des valeurs spécifiques à chaque saison :

- Hiver :
 - o EV2 = engrais vert intermédiaire - stade 2
- Printemps :
 - o SAP = salade de printemps
 - o TO1 = tomate – stade 1
 - o OI1 = oignon – stade 1

- Eté :
 - o SAE = salade d'été
 - o TO2 = tomate stade 2
 - o ME = melon
 - o CA1 = carotte – stade 1
 - o OI2 = oignon – stade 2
- Automne :
 - o EC = engrais vert court
 - o EV1 = engrais vert intermédiaire - stade 1
 - o SAA = salade d'automne
 - o CA2 = carotte – stade 2

Le domaine d'une variable à une saison donnée comporte donc au maximum 7 valeurs possibles.

Evolution temporelle des occupations du sol sur une unité spatiale

Evolution temporelle des arbres

Les arbres doivent tous être affectés à des unités spatiales à $t=0$: ils ne peuvent pas apparaître sur une unité spatiale au cours de la modélisation, à $t>0$. Un arbre positionné à $t=0$ occupe obligatoirement la même position pour tous les pas de temps suivants.

Evolution temporelle des autres espèces

Les espèces maraîchères doivent être affectées selon les saisons auxquelles elles sont associées : par exemple, l'espèce SAP est associée à la saison printemps, et ne peut donc être affectée qu'aux pas de temps correspondant à des printemps, soit $t \in \{2,6\}$.

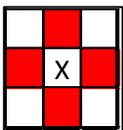
Pour les espèces qui ont des cycles culturaux sur plus d'une saison (maximum 2 phases ici), le choix de la valeur XX1 à un instant t pour l'unité spatiale (i,j) fixe la valeur de XX2 sur cette même unité spatiale à l'instant $t+1$. Par exemple, si $x_{i,j,1} = TO1$, alors obligatoirement $x_{i,j,2} = TO2$.

Traduction des contraintes temporelles sous formalisme CSP

Il est choisi de modéliser toutes les contraintes temporelles ci-dessus au moyen de contraintes binaires dures, déterminant les transitions de culture autorisées entre 2 saisons successives sur une même unité spatiale.

Positionnement relatif des arbres

Les arbres, toutes espèces confondues, doivent respecter un espacement minimal de plantation leur permettant une croissance non conflictuelle et une meilleure fructification par plus grande interception de lumière. Cette distance minimale entre 2 arbres est modélisée comme étant une unité spatiale d'écartement dans les directions horizontale et verticale autour d'un arbre, mais pas diagonale :



L'unité spatiale centrale est affectée à un arbre.
Sur les unités spatiales en rouge, l'affectation d'un arbre est interdite (contrainte stricte).

Cette contrainte d'écartement des arbres doit être vérifiée seulement au pas de temps $t=0$ puisque les arbres ne changent pas de position au cours de la modélisation.

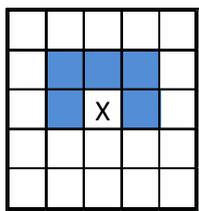
Traduction des contraintes d'espacement minimal des arbres sous formalisme CSP

La contrainte d'espacement minimal des arbres est modélisée au moyen de contraintes binaires dures sur les unités spatiales adjacentes à une unité portant un arbre. Les contraintes binaires portent sur la présence d'un arbre, avec un coût infini si deux variables « adjacentes » portent toutes les deux un arbre. 4 contraintes binaires, une pour chaque unité adjacente, sont définies pour chaque unité spatiale, au pas de temps $t=0$.

Effet de l'interception de la lumière sous les arbres

L'interception de la lumière par les arbres génère des zones d'ombre autour des arbres, dont l'étendue varie selon la morphologie des arbres, elle-même liée à leur âge. Sur la base des simulations d'interception de lumière par des arbres isolés (cf images Gilles Vercambre), et des courbes de croissance des arbres fruitiers (cf fiches espèces), et compte tenu de la granularité du découpage spatial défini pour le modèle, les choix suivants sont faits :

- Pendant la période 1, les zones d'ombre ne sortent pas des unités spatiales portant des arbres : il n'y a donc pas d'impact sur les cultures maraîchères.
- Pendant les périodes 2 et 3, les zones d'ombre sont identiques, localisées sur la moitié nord, et à l'est et ouest de l'unité spatiale portant un arbre :



Les arbres fruitiers portent des feuilles d'avril à octobre, avec des densités de houppiers moins importantes en début et fin de cet intervalle. Etant donné que le découpage temporel du modèle est fait selon les saisons (et non les mois), il est choisi de modéliser l'impact des zones d'ombre seulement pour les saisons printemps et été des périodes 2 et 3, soit les pas de temps de $t \in \{2, 3, 6, 7\}$.

Selon les espèces maraîchères et la saison, l'ombre a une influence positive ou négative sur la culture : une fonction de coût est utilisée, avec un coût nul pour les cas les plus favorables (influence positive), un coût d'ordre 1 pour les cas de non-influence, et un coût d'ordre 2 pour les cas les moins favorables (influence négative). En prenant en compte les sensibilités des espèces maraîchères à la perte de rayonnement solaire, on obtient la fonction de coût suivante pour les saisons printemps et été :

Espèce	Printemps	Eté
Salade Printemps	1	N/A
Salade Eté	N/A	0
Salade Automne	N/A	N/A
Tomate	1	0
Melon	N/A	2
Carotte	N/A	1
Oignon	2	1
EV court	N/A	N/A
EV intermédiaire	N/A	N/A

(N/A = non applicable)

Traduction des effets de l'interception de la lumière sous formalisme CSP

En préambule à la modélisation de la fonction de coût des effets de l'ombre sur les cultures, 2 séries de variables intermédiaires sont calculées :

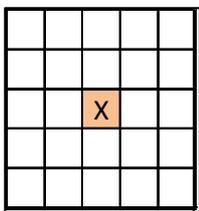
- Une variable indiquant si un arbre est présent sur une unité spatiale : un booléen par unité spatiale, calculé à $t=0$, puisque les arbres sont tous positionnés définitivement à ce pas de temps.
- Une variable indiquant si une unité spatiale est impactée par l'ombre d'au moins un arbre : un autre booléen par unité spatiale, également calculé à $t=0$.

La variable intermédiaire ombre étant calculée, la fonction de coût des effets de l'ombre sur les espèces maraîchères est modélisée par des contraintes binaires floues entre la variable représentant une unité spatiale au printemps ou à l'été et la variable intermédiaire ombre associée à cette unité spatiale : quand l'unité spatiale est à l'ombre, des coûts d'ordres 0, 1 ou 2 sont respectivement associés aux cultures favorables, neutres ou défavorables, selon la table ci-dessus ; quand l'unité spatiale n'est pas à l'ombre, un coût d'ordre 1 est associé aux cultures favorisées par l'ombre, pour inciter leur placement à l'ombre, qui a un coût moindre, de 0.

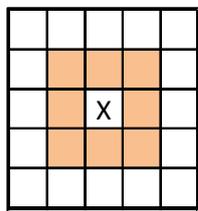
Compétition pour l'eau entre arbres et cultures

La compétition pour l'eau a lieu lorsque les systèmes racinaires d'un arbre et d'une culture occupent les mêmes compartiments du sol, et que l'eau est un facteur limitant. Dans le modèle, on fait l'hypothèse que l'eau est potentiellement un facteur limitant seulement en été. Les cas de systèmes racinaires concurrents dans le sol d'une unité spatiale sont fonction des systèmes racinaires de l'arbre et de la culture.

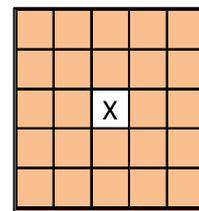
Selon certains éléments de bibliographie, les systèmes racinaires des arbres ont des zones d'extension autour de l'arbre qui s'élargissent au cours du temps. Pour le modèle, divisé en 3 périodes représentant 3 phases de croissance des arbres, on estime les zones d'extension des racines comme suit :



Période 1



Période 2



Période 3

Dans les zones où les cultures maraîchères sont possibles (c'est-à-dire sur les unités spatiales où il n'y a pas d'arbres), le sol est souvent travaillé en surface, ayant pour effet de détruire les racines superficielles des arbres, empêchant la compétition dans cette zone. Par contre, les racines des arbres sont présentes dans tout le reste de l'horizon (non travaillé), sur tout le périmètre d'extension ci-dessus. La compétition entre les racines d'arbres et les cultures peut donc se produire sur des unités spatiales dans la zone d'extension des racines des arbres, avec des cultures à des stades lors desquels elles ont des racines qui descendent en profondeur.

Compte tenu de l'hypothèse de déficit hydrique seulement en été, et sachant que les cultures présentes l'été sont la salade, la tomate au stade 2, le melon, la carotte au stade 1, et l'oignon au stade 2, la description des systèmes racinaires des cultures trouvée dans la bibliographie nous permet de déterminer que la compétition peut avoir lieu avec toutes les cultures estivales, sauf le melon et l'oignon, qui ont des systèmes racinaires cantonnés aux 30 premiers centimètres de sol.

La compétition pour l'eau a un impact négatif sur le bon développement des cultures impactées : une fonction de coût est utilisée, avec un coût nul pour les cas sans compétition, un coût d'ordre 1

pour les cas de compétition potentielle avec salade et carotte, et un coût d'ordre 2 pour les cas de compétition potentielle avec tomate, plus gourmande en eau.

Traduction des effets de la compétition pour l'eau sous formalisme CSP

En préambule à la modélisation de la fonction de coût des effets de la compétition racinaire sur les cultures, 2 séries de variables intermédiaires sont calculées :

- Une variable indiquant si une unité spatiale est impactée par les racines d'au moins un arbre en période 2 : un booléen par unité spatiale, calculé à $t=0$, puisque les arbres sont tous positionnés définitivement à ce pas de temps.
- Une variable indiquant si une unité spatiale est impactée par les racines d'au moins un arbre en période 3 : un autre booléen par unité spatiale, calculé également à $t=0$.

Les variables intermédiaires extension des racines étant calculées, la fonction de coût des effets de la compétition pour l'eau sur les espèces maraîchères est modélisée par des contraintes binaires floues entre la variable représentant une unité spatiale en été de période 2 ou 3, et la variable intermédiaire extension des racines associée à cette unité spatiale, respectivement en période 2 ou 3: quand l'unité spatiale est impactée par les racines des arbres, un coût est associé aux cultures pénalisées par la compétition.

Partage de l'eau disponible entre arbres et cultures

Un partage de l'eau disponible entre un arbre et une culture a lieu lorsque la partie profonde du système racinaire de l'arbre utilise l'eau en surplus non prélevée par les racines des cultures qui se trouvent dans des compartiments de sol moins profonds. Ce partage ne peut avoir lieu que s'il y a un surplus d'eau pour les cultures, qui alors ne prélèvent pas toute l'eau qui leur est disponible. Dans le modèle, on fait les hypothèses que l'eau est potentiellement en surplus aux saisons autres que l'été, et que les zones d'extension des racines des arbres pour le partage de l'eau sont les mêmes que celles définies pour la compétition pour l'eau.

Le partage de l'eau entre les racines d'arbres et les cultures peut se produire sur des unités spatiales dans la zone d'extension des racines des arbres, dès l'instant qu'une culture quelle qu'elle soit est présente sur cette unité spatiale, aux saisons autres que l'été.

Le partage de l'eau a un impact positif sur l'utilisation de l'eau disponible, et doit permettre d'apporter moins d'eau d'irrigation aux arbres. Les unités spatiales où le partage est possible, mais sur lesquelles il n'y a pas de culture (sol nu) sont des unités sur lesquelles il y a un manque à gagner ; en parallèle, et pour renforcer la prise en compte de l'un des avantages de l'agroforesterie, il est aussi considéré qu'il y a manque à gagner si une culture maraîchère est située sur une unité spatiale où les racines des arbres ne sont pas présentes (c'est-à-dire loin des arbres). Une fonction de coût est utilisée, avec un coût nul pour les cas de partage avérés, et un coût d'ordre 1 pour les cas où une opportunité de partage n'est pas exploitée (sol nu ou racines d'arbres absentes).

Traduction des effets du partage de l'eau sous formalisme CSP

Les variables intermédiaires déterminant les unités spatiales d'extension des racines des arbres, calculées pour la compétition pour l'eau, sont réutilisées pour le partage de l'eau.

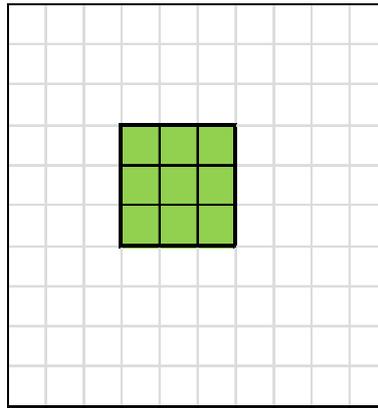
La fonction de coût des effets du partage de l'eau est modélisée par des contraintes binaires floues entre la variable représentant une unité spatiale en hiver, printemps ou automne, et de période 2 ou 3, et la variable intermédiaire extension des racines associée à cette unité spatiale, respectivement en période 2 ou 3 : quand l'unité spatiale est impactée par les racines des arbres, un coût d'ordre 1 est associé au sol nu ; quand l'unité spatiale porte une culture maraîchère, un coût d'ordre 1 est associé si les racines des arbres ne sont pas présentes sur l'unité.

Dispersion des cultures

La dispersion des cultures maraîchères d'une même espèce sur la parcelle a un impact sur le temps de travail nécessaire pour les cultiver : cela prend plus de temps de travailler des cultures dispersées que des cultures regroupées sur des unités spatiales adjacentes.

La dispersion des cultures maraîchères est évaluée sur des sous-ensembles de 9 unités spatiales représentant une unité spatiale de culture maraîchère, et les 8 unités spatiales l'entourant. Un coût de dispersion est calculé sur chacun de ces sous-ensembles, en fonction du nombre d'unités spatiales portant la même culture :

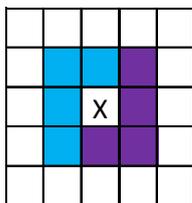
- Nombre n d'unités portant la culture $X = 0$ -> coût = 0
- Nombre n d'unités portant la culture X entre 1 et 8 -> coût = $k \cdot (9 - n)$
- Nombre n d'unités portant la culture $X = 9$ -> coût = 0



Ce calcul de coût est fait pour toutes les unités spatiales «intérieures» (pas sur les unités spatiales de bordure de parcelle), soit 64 unités, et à chaque pas de temps, pour les types de cultures maraîchères présentes dans la saison correspondant au pas de temps.

Traduction des contraintes de dispersion sous formalisme CSP

Pour le modèle de preuve de concept, la dispersion des espèces maraîchères est modélisée par des contraintes binaires floues comparant 2 à 2 une unité spatiale avec 4 de ses voisines (nord, nord-ouest, ouest, sud-ouest), affectant un coût de 1 chaque fois que les espèces diffèrent. Pour une unité donnée, les comparaisons binaires avec 4 des 8 unités voisines suffisent, car les 4 autres comparaisons seront faites lors du calcul sur ces 4 autres voisines (voir schéma ci-dessous). Ces contraintes doivent être définies pour chaque unité spatiale, sauf la première ligne et la première colonne, et pour chaque pas de temps.



Pour l'unité spatiale centrale X , les 4 comparaisons binaires directes sont faites avec les cellules bleues, alors que les comparaisons complémentaires indirectes sont faites lors des comparaisons directes des cellules en mauve.

Pénalisation des sols nus

Par rapport à une culture, un sol nu représente un manque à gagner pour l'exploitation. Afin de minimiser la présence de sols nus dans les solutions proposées, un coût est associé aux variables qui prennent la valeur « sol nu », quelle que soit la saison.

Répartition des productions au cours de l'année

Les productions maraîchères et fruitières doivent être étalées tout au long de l'année, avec une mixité des productions maraîchères à chaque saison, c'est-à-dire pas de monoculture d'une espèce à une saison donnée. Il est également souhaité d'avoir un minimum de surface en engrais vert en automne et hiver.

Traduction de la répartition des cultures au formalisme CSP

La mixité des cultures maraîchères à une saison donnée, et le minimum de surface en engrais vert sont modélisés par des contraintes de cardinalité *sgcc* à chaque saison, en fonction des cultures présentes.

Répartition des temps de travaux au cours de l'année

Dans une première approche, il n'y a pas de modélisation à proprement parler de contraintes de répartition des temps de travaux au cours de l'année : cette répartition est supposée assurée par les contraintes de mixité des cultures par saison.

Une possibilité serait d'utiliser une fonction de coût pénalisant les cultures les plus demandeuses en temps de travail dans les saisons les plus tendues.

Annexe 3 – Options d'exécution des modèles

Le tableau qui suit récapitule les résultats après 1 heure d'exécution des modèles, selon les options suivantes :

- Heuristique de recherche des solutions : heuristique à divergence limitée (Limited Discrepancy Search, option -I) ou heuristique à reprise aléatoire (Randomized Search with Restart, option -L).
- Coût unitaire de violation des contraintes de mixité des cultures maraîchères : 100 ou 1000 par violation.

Les colonnes du tableau représentent les caractéristiques des solutions trouvées :

- Nb arbres : nombre d'arbres de la solution.
- Nb écarts : nombre de violations des contraintes de mixité des cultures.
- Coût : coût total de la solution proposée.

Options	Nb arbres	Nb écarts	Coût
Scénario : Equilibré			
L - 1000	34	14	20840
L - 100	33	21	8730
1 - 1000	12	6	13770
1 - 100	15	12	8270
Scénario : Ombre/soleil			
L - 1000	27	50	62480
L - 100	28	76	15530
1 - 1000	9	7	18630
1 - 100	8	12	11880
Scénario : Compétition			
L - 1000	30	9	28740
L - 100	39	99	19620
1 - 1000	9	8	16910
1 - 100	7	7	9240
Scénario : Partage			
L - 1000	36	44	53710
L - 100	35	62	12720
1 - 1000	25	6	19920
1 - 100	30	79	12840

Les coûts totaux des solutions avec un coût unitaire de violation des contraintes de mixité à 100 paraissent plus faibles, mais ils sont en réalité relativement plus élevés puisque les coûts de violation des contraintes de mixité y sont 10 fois moindres.

Pour tous les scénarios étudiés, l'heuristique de recherche à divergence limitée (option -I) et le coût unitaire de violation de mixité à 1000 donnent les solutions les meilleures (en rouge dans le tableau), à la fois en termes de coût total de la solution, de nombre minimal de violation des contraintes de mixité, et de nombre d'arbres correspondant à des systèmes agroforestiers plus stables dans le temps.

Annexe 4 – Caractéristiques des solutions analysées

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats d'exécution du solveur *toulbar2* pour aboutir aux solutions retenues pour analyse dans le cadre de la preuve de concept. Ces solutions correspondent aux modèles sans contraintes de non-dispersion du maraîchage.

La phase 1 d'exécution des modèles est stoppée au bout d'une heure.

La phase 2 prend comme contrainte supplémentaire les arbres positionnés par la solution trouvée en phase 1, et est stoppée au bout d'une journée.

Les colonnes « Nb écarts » représentent les nombres totaux de violations des contraintes de mixité des cultures maraîchères par solution, tous pas de temps confondus.

Les colonnes « Nb sols nus » représentent les nombres totaux de sols nus affectés par solution, tous pas de temps confondus.

Scénario	Coût total Phase 1	Nb arbres	Nb écarts Phase 1	Nb sols nus Phase 1	Limite inférieure (*)	Coût total Phase 2	Nb écarts Phase 2	Nb sols nus Phase 2
Equilibré	13370	12	6	78	6500	12620	6	60
Ombre	18630	9	7	90	9280	15560	6	80
Compétition	16910	9	8	77	7600	13590	6	64
Partage	19920	25	6	70	13940	19140	6	68

(*) Limite inférieure de coût total de solution avec les arbres positionnés en phase 1 ; valeur reportée par *toulbar2*

Annexe 5 – Détail des solutions analysées

Les pages qui suivent représentent, pour chaque scénario analysé au paragraphe III.3.3.3, sans contraintes de non-dispersion du maraîchage, le positionnement des cultures sur les unités spatiales du modèle, à chaque saison des périodes 2 et 3.

Légende de représentation des types d'unités spatiales

ARB	Arbre
	Ombre - Racines
	Soleil - Racines
	Soleil - Pas de racines

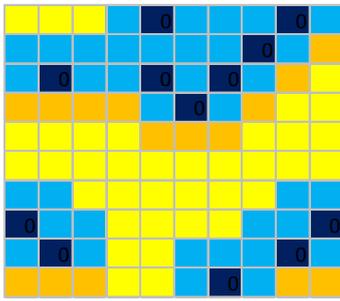
Légende de représentation des cultures

ARB	Arbre
	Salade
	Tomate
	Oignon
	Carotte
	Melon
	Engrais vert
	Sol nu

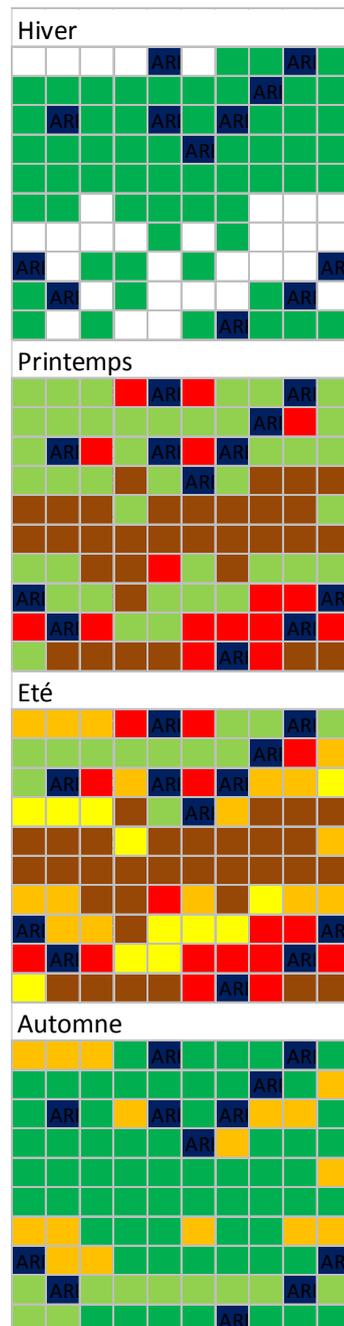
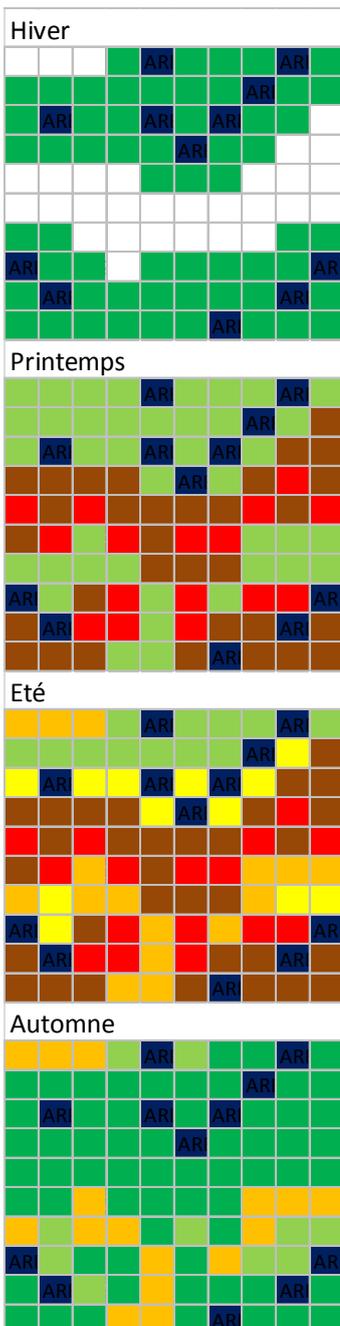
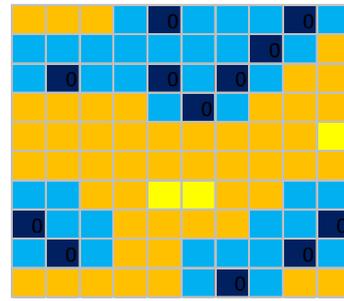
Pour chaque scénario analysé, la colonne de gauche représente la période 2 avec en première position la typologie des unités spatiales à cette période, suivie des positionnements de cultures aux saisons hiver, printemps, été, automne, dans l'ordre. La colonne de droite est similaire pour la période 3.

Scénario équilibré

Période 2

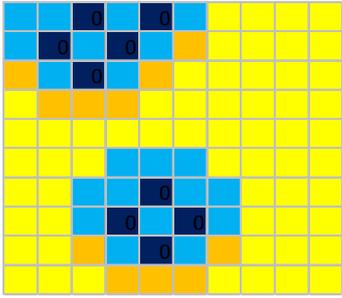


Période 3

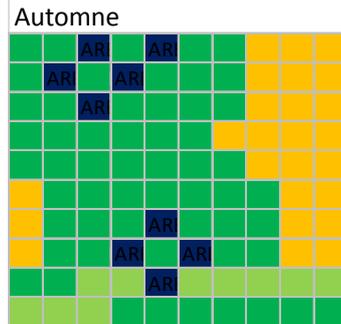
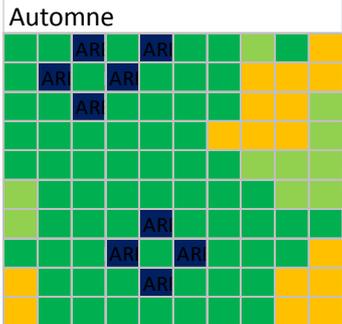
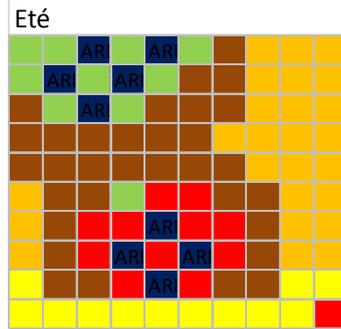
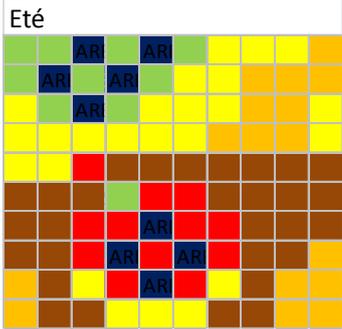
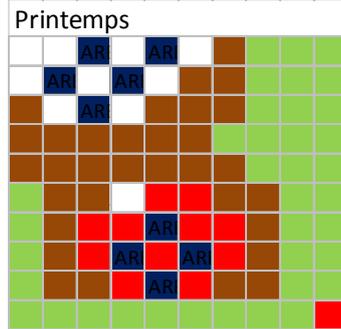
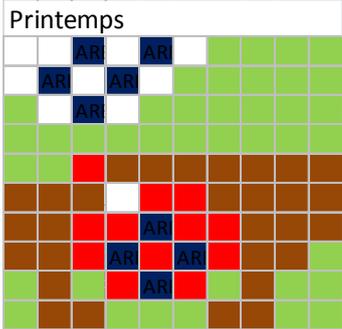
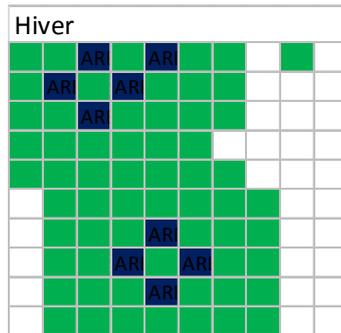
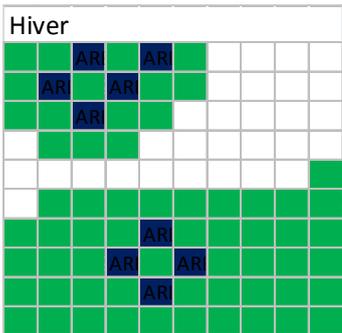
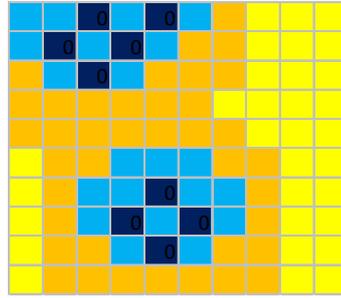


Scénario ombre/soleil

Période 2

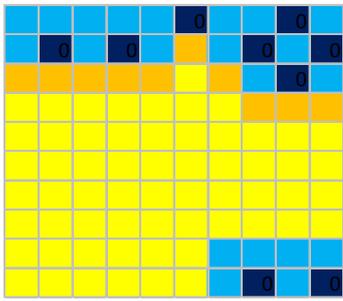


Période 3

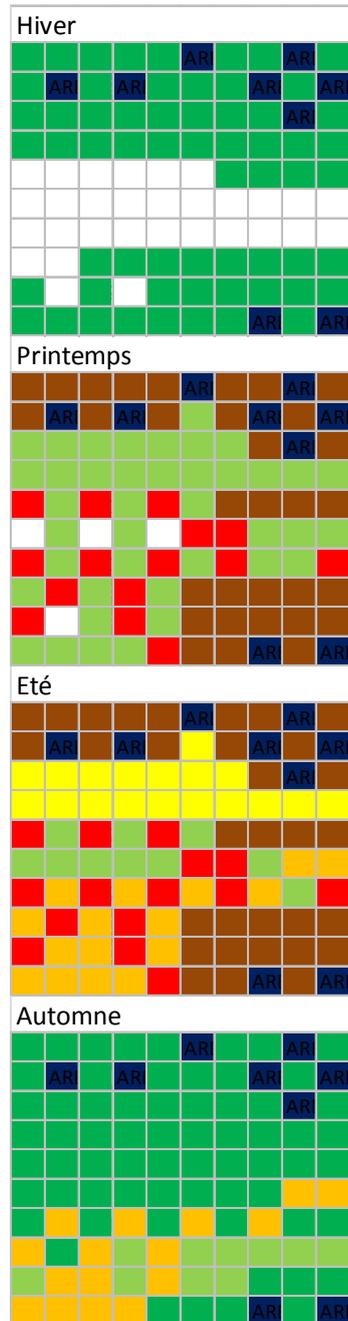
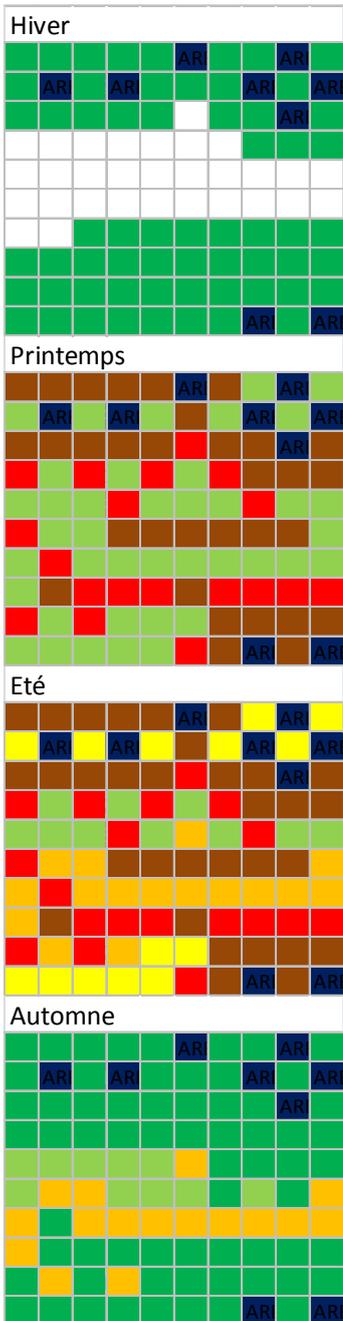
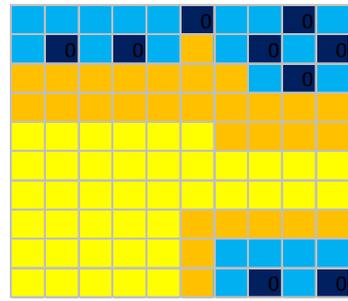


Scénario compétition

Période 2

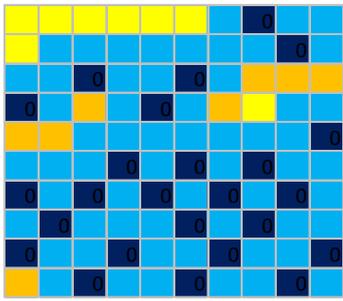


Période 3

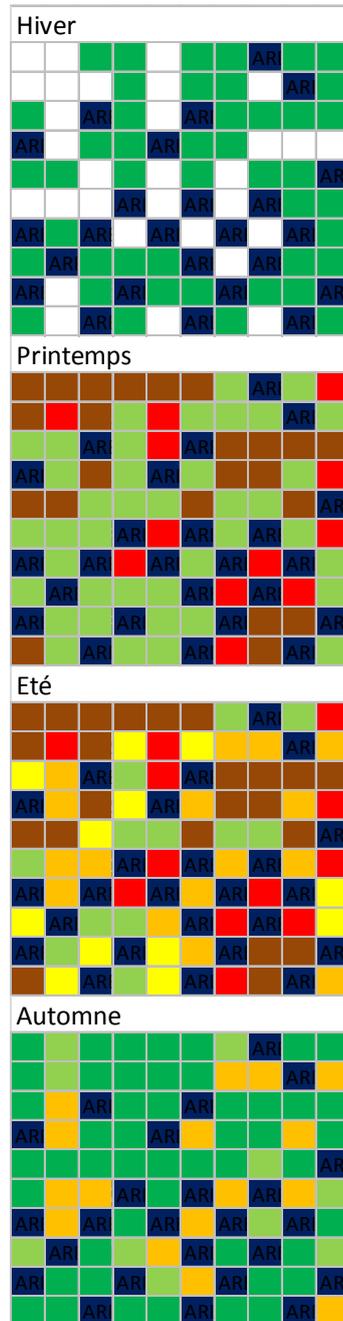
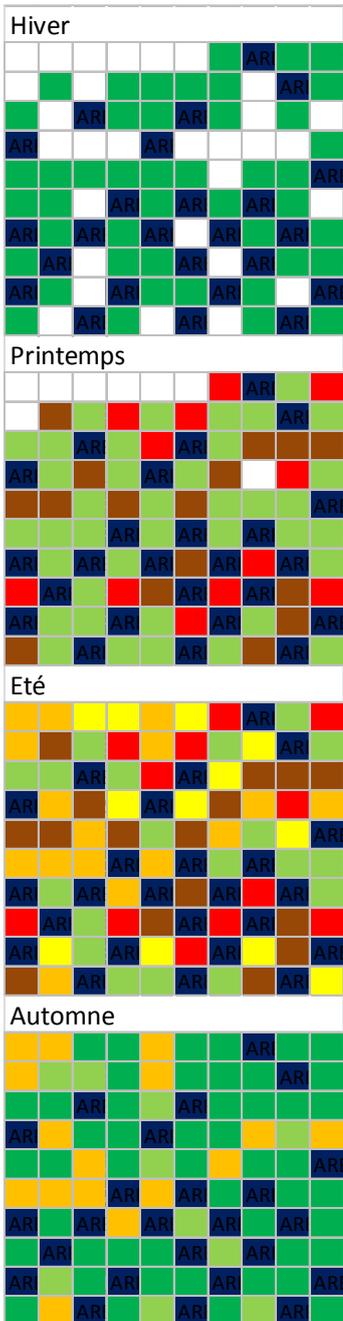
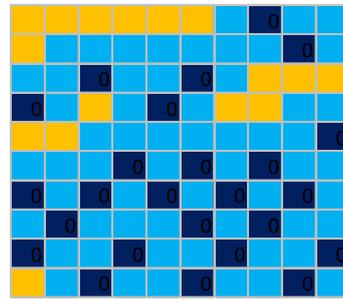


Scénario partage

Période 2



Période 3





GODIN, Emmanuelle, 2013. *Utilité des problèmes de satisfaction de contraintes pour l'aide à la conception de vergers maraîchers.* 40 pages + annexes, mémoire de fin d'études, VetAgroSup Clermont-Ferrand.

STRUCTURE D'ACCUEIL

Institut National de Recherche Agronomique (INRA) – Centre d'Avignon
Département Sciences pour l'Action et le Développement (SAD)
Unité Ecodéveloppement.

ENCADREMENT

Maître de stage : TCHAMITCHIAN, Marc (Directeur de l'unité Ecodéveloppement)
Tuteur pédagogique : CAPITAINE, Mathieu

OPTION Agriculture, Productions Végétales et Environnement

Résumé

La nécessaire écologisation des pratiques agricoles dans les pays développés se traduit depuis quelques années par la recherche de systèmes innovants à la fois rentables économiquement et respectueux de l'environnement, avec des objectifs de durabilité à moyen et long termes. Les systèmes agroforestiers, associant arbres et cultures sur une même parcelle, sont de ces systèmes écologiquement intensifs qui permettent une meilleure exploitation des ressources naturelles disponibles, et donc un niveau de production accru sur une même surface. Le verger maraîcher, un système agroforestier horticole associant arbres fruitiers et cultures maraîchères, a été délaissé au milieu du siècle dernier pour des raisons économiques, mais fait aujourd'hui l'objet de recherches pour sa possible réintroduction à des fins écologiques, avec des fondements agronomiques pour assurer sa rentabilité.

Les fondements agronomiques des vergers maraîchers sont une conjonction de résultats scientifiques et de retours d'expérience d'agriculteurs, concernant les interactions entre arbres fruitiers et cultures maraîchères. Ces fondements constituent le socle commun de connaissances qui peut être mobilisé lors de démarches de co-conception de vergers maraîchers, en particulier pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision, dont les modèles. Une preuve de concept de modélisation sous forme de problème de satisfaction de contraintes (CSP) est construite, proposant des agencements de vergers maraîchers tirant au mieux parti d'une sélection d'interactions entre arbres et cultures. Cette preuve de concept pose les bases d'un modèle plus complet, de formalisme CSP ou autre, qui pourrait être mis en œuvre dans l'accompagnement de la conception de systèmes associant arbres et cultures.

Mots-clés : agrisylviculture, verger maraîcher, aide à la conception, modélisation, problème de satisfaction de contraintes, représentation spatio-temporelle