HAL
open science

Outils d'aide à la conception de systèmes de production maraîchers urbains optimisés pour la vente en circuits courts et de proximité

Nicolas Brulard

▶ **To cite this version:**

Nicolas Brulard. Outils d'aide à la conception de systèmes de production maraîchers urbains optimisés pour la vente en circuits courts et de proximité. Recherche opérationnelle [math.OC]. Communauté Universite Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : . tel-01741853

HAL Id: tel-01741853

https://hal.science/tel-01741853

Submitted on 23 Mar 2018

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

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

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **GI : Génie Industriel : conception et production**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Nicolas BRULARD

Thèse dirigée par **Van-dat CUNG, Professeur, Grenoble INP**,
et codirigée par **Nicolas CATUSSE, MCF, Grenoble INP**

préparée au sein du **Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble**
dans **l'École Doctorale I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production**

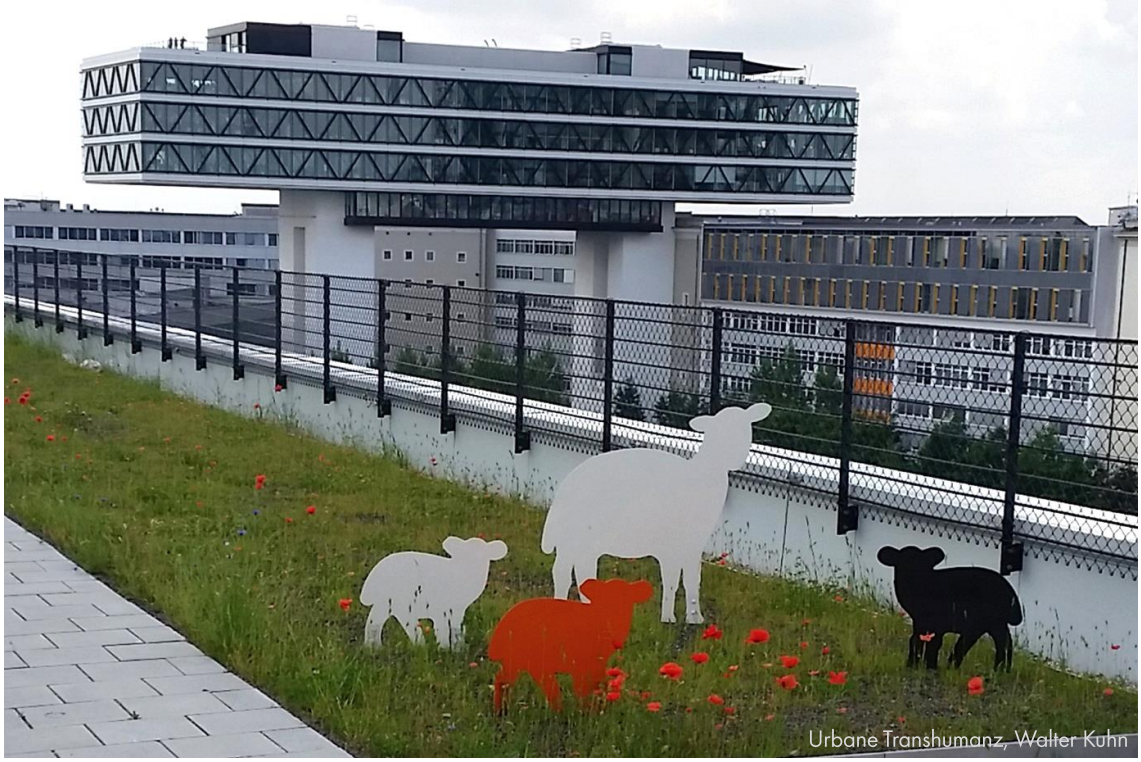
Outils d'aide à la conception de systèmes de production maraîchers urbains optimisés pour la vente en circuits courts et de proximité

Decision support models to design urban farming systems optimized for selling fruits and vegetables in short and local supply chains

Thèse soutenue publiquement le **23 janvier 2018**
devant le jury composé de :

Mme Maria DI MASCOLO
Directrice de Recherche, CNRS, Présidente du Jury
Mme Catherine DA CUNHA
Maître de Conférences HDR, École Centrale de Nantes, Rapporteur
M. Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS
Professeur, École Nationale Supérieure des Mines de St-Étienne, Rapporteur
M. Laurent ALFANDARI
Professeur, ESSEC Business School Paris, Examinateur
M. Nicolas CATUSSE
Maître de conférences, Grenoble INP, Co-Encadrant de thèse
M. Van-Dat CUNG
Professeur, Grenoble INP, Directeur de thèse

OUTILS D'**AIDE À LA CONCEPTION** DE **SYSTÈMES DE PRODUCTION MARAÎCHERS URBAINS OPTIMISÉS** POUR LA VENTE EN **CIRCUITS COURTS ET DE PROXIMITÉ**



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Génie Industriel

Présentée par

Nicolas Brulard

Thèse dirigée par **Van-Dat Cung**
et co-encadrée par **Nicolas Catusse**
préparée au sein du laboratoire **G-SCOP**
et de l'école doctorale **I-MEP2**

Thèse CIFRE financée par l'**ANRT**
préparée au sein de l'entreprise
Les Fermes de Gally
et co-encadrée par **Xavier Laureau**

Thèse soutenue publiquement le **23 janvier 2018**,
devant le jury composé de :

Mme Maria DI MASCOLO	Directrice de Recherche, CNRS, Présidente du Jury
Mme Catherine DA CUNHA	Maître de Conférences HDR, École Centrale de Nantes, Rapporteur
M. Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS	Professeur, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Rapporteur
M. Laurent ALFANDARI	Professeur, ESSEC Business School Paris, Examinateur
M. Xavier LAUREAU	Co-gérant des Fermes de Gally, Invité
M. Nicolas CATUSSE	Maître de conférences, Grenoble INP, Co-Encadrant de thèse
M. Van-Dat CUNG	Professeur, Grenoble INP, Directeur de thèse

G-SCOP SCIENCES POUR LA CONCEPTION, L'OPTIMISATION ET LA PRODUCTION

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

LES FERMES DE GALLY

Nous avons un choix fondamental dans l'existence :
être heureux ou avoir raison.

Marshall B. Rosenberg

Remerciements

Ce manuscrit marque la fin de trois années intenses, au cours desquelles j'ai pu compter sur le soutien et la collaboration de nombreuses personnes. Je tiens à leur exprimer ma gratitude et à les remercier pour leur implication dans cette étape passionnante de ma vie.

Je remercie en premier lieu ma famille, en particulier ma femme et mon fils. Votre soutien et votre patience m'ont accompagné et m'ont aidé à parfois (trop souvent ?) renoncer à une soirée détente pour finir un modèle, préparer une conférence ou finaliser un dossier du Bureau d'Etudes. Je mesure vos efforts pour me permettre de réaliser cette thèse et je vous en suis très reconnaissant. J'ai eu la chance de vivre tant de beaux moments en famille. Merci !

Je souhaite remercier très chaleureusement Van-Dat Cung et Nicolas Catusse qui ont accepté de diriger ma thèse. Merci Van-Dat, pour avoir dirigé avec enthousiasme la recherche d'un agronome qui découvrait la Recherche Opérationnelle ! Merci Nicolas, pour avoir été toujours disponible pour me sortir des modélisations hasardeuses ! Je me suis senti bien accompagné par vos approches, méthodes et tempéraments très complémentaires.

Je tiens aussi à remercier Xavier et Dominique Laureau, co-gérants des Fermes de Gally, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser cette thèse au sein de leur entreprise. Conjuguer les calendriers d'une PME et d'une thèse a été un défi complexe, mais il m'a permis de travailler sur des projets passionnants et variés avec des personnes passionnées, que je ne pourrai pas toutes citer : Alexis, Etienne, Sandra, Amélie, Mathilde, Evelyne, Benoit, Béatrice, Mathieu, Christophe, Erwan, Vincent, Jean, Pierre, Isabelle, Nicolas, Nicolas, Isabelle, Jacqueline, Laurence, Marianne, Amandine, Didier, Romain, Jean-Luc, Laurent, Clément, ... L'aventure continue !

Le temps passé à G-SCOP a été très instructif et très plaisant grâce aux équipes de permanents, de doctorants et d'administratifs qui font la vie du laboratoire. Merci à Hadrien Cambazard, Nicolas Catusse et Bernard Penz qui m'ont permis d'enseigner et ont partagé leurs méthodes et leur passion pour la pédagogie ! Merci à Fabrice Gravelat et Jonathan Martinat, ingénieurs de recherche qui se sont arrachés quelques cheveux sur le projet d'interface de l'outil d'aide à la décision. Merci à Florence et Kean, ce fut un plaisir de partager le bureau H320 avec vous ! Merci aux stagiaires qui m'ont bien aidé dans ma recherche, notamment Cyril Dutrieux et Mohammed Sameh Belaid.

Un grand merci à Geoffrey Lafosse, de la Chambre d'Agriculture de l'Isère. Nos échanges réguliers sur les besoins réels des agriculteurs en outils d'aide à la décision m'ont été très utiles. Un grand merci à Laurent Parrot et Thierry Michels, du CIRAD, qui m'ont offert l'opportunité de collaborer sur un programme de recherche à la Réunion pour explorer les usages possibles dans d'autres contextes des modèles que nous développions pour l'agriculture urbaine.

Merci à vous lecteurs connus ou inconnus de vous plonger dans ces pages !

Nicolas Brulard, nicolas.brulard@grenoble-inp.org

Résumé

Résumé : Pour accompagner le développement des fermes urbaines professionnelles et des circuits courts et de proximité dans les grandes métropoles, nous proposons des outils à base de programmes mathématiques d'aide à la conception de fermes maraîchères diversifiées ciblant les demandes de différents types de clients en fruits et légumes frais locaux. Les solutions techniques de culture en ville se développent rapidement, mais compte-tenu des contraintes fortes de la production agricole urbaine (foncier limité, coûts opérationnels élevés), la définition de modèles économiques viables pour des fermes pérennes est un vrai défi pour les maraîchers urbains. Trois modèles en programmation linéaire mixte sont présentés et confrontés aux résultats du terrain : un modèle de planification tactique des fermes maraîchères, un modèle de dimensionnement stratégique des fermes maraîchères et un modèle de sélection de la meilleure combinaison de clients. Des résultats numériques et les performances des modèles sont présentés à partir de cas concrets multi-produits, multi-techniques et multi-périodes. Nos contributions résident dans la prise en compte de la périssabilité des produits frais dans le dimensionnement stratégique des systèmes de production, incluant le dimensionnement de la main d'œuvre agricole.

Mots clés : Recherche Opérationnelle, allocation de ressources, dimensionnement et planification intégrés, conception de systèmes agricoles urbains, produits périssables, fruits et légumes.

Decision support models to design urban farming systems optimized for selling fruits and vegetables in short and local supply chains.

Abstract : To support the urban farm emergence trend in large metropolises, we propose decision support tools based on mathematical programs to design market gardening farms targetting the demands of different categories of clients in local fresh fruits and vegetables. Technical solutions develop rapdily, but the strong constraints linked to urban farming, such as limited surface and high operating costs, make difficult to define viable and sustainable business models for urban market gardeners. Three mixed integer linear programming models are presented : A tactical farm planning model, a plurennial strategic sizing model for diversified fruit and vegetable farms, and a client combination selection model. Numerical results and model performances are presented, based on multi-products, multi-techniques and multi-periods real cases. Our main contributions are the consideration of the perishable nature of fruits and vegetables in strategic production systems sizing models, including notably the investments and workforce sizing.

Keywords : Operations Research, resource allocation, integrated sizing and planning, urban farming system design, perishable products, fruits and vegetables

Table des matières

Remerciements **5**

Résumé **7**

Introduction **13**

1 L'agriculture urbaine au sein des Fermes de Gally 13

1.1 D'une ferme francilienne à une entreprise diversifiée autour de la nature en ville 13

1.2 Le développement d'une expertise agriculture urbaine : quels usages et quels projets dans des contextes urbains complexes ? 15

2 Contexte et problématiques pour la conception de fermes urbaines viables 17

3 Objectifs, démarche et contributions de la thèse 18

3.1 Objectifs de notre recherche 18

3.2 Démarche suivie dans la thèse 19

4 Structure de la thèse et contributions 20

1 L'aide à la décision stratégique et tactique pour les systèmes de production maraîchers urbains et les circuits courts : un état de l'art **23**

1 Une agriculture urbaine en pleine croissance, à la recherche d'un modèle économique . 24

1.1 Agriculture, alimentation et ville : définitions, tendances, enjeux 24

1.2 Les spécificités et les enjeux des fermes urbaines que nous étudions 29

1.3 Trouver un modèle économique viable dans un milieu contraint 34

2 Modélisation et aide à la décision pour les exploitations et les filières agricoles 35

2.1 Le système de production agricole, un modèle du fonctionnement de l'exploitation agricole 35

2.2 La conception de systèmes de production agricoles assistée par modèle 38

3 Conclusion sur l'état de l'art 44

2 Un modèle de planification tactique des fermes maraîchères **45**

1 Description du problème de planification 47

2 Un état de l'art des approches de modélisation 47

2.1 Combiner plusieurs activités et plusieurs produits au sein du système de production . . . 48

2.2 La conception de systèmes de production avec produits et stocks périssables 49

2.3 La modélisation des itinéraires techniques 52

2.4 La modélisation de la main d'œuvre dans les systèmes de production agricoles 54

3 Le modèle de planification tactique en programmation linéaire mixte 57

3.1 Maximiser le revenu de la ferme 57

3.2 Contraintes du problème *59*
4 Approche de la complexité du problème et amélioration de la résolution 65
4.1 Complexité théorique du problème *65*
4.2 Réduction de la taille du réseau *67*
4.3 Réduction de la borne supérieure des surfaces *67*
5 Résultats numériques et analyse des performances du modèle 69
5.1 Etude sur Les Fermes en Villes *69*
5.2 Analyse des performances du programme linéaire mixte sur des instances artificielles . . *76*
5.3 Quels apports de ce modèle pour les chefs d'exploitation agricole *79*
6 Conclusion et perspectives 79

3 Un modèle de dimensionnement stratégique des fermes maraîchères 81
1 Description du problème de dimensionnement stratégique 82
2 Un état de l'art sur les rotations de cultures et les changements de lignes de production 85
2.1 La définition de nouvelles successions de culture *85*
2.2 Les modèles d'évaluation multicritères des rotations de culture *86*
2.3 Les problèmes de dimensionnement des équipements productifs et les problèmes avec coûts et temps fixes séquence-dépendants *87*
3 Le modèle de dimensionnement stratégique en programmation linéaire mixte 88
3.1 Maximiser le revenu pluri-annuel de la ferme *89*
3.2 Contraintes sur les enchaînements d'infrastructures *91*
3.3 Enchaînements de familles botaniques *94*
3.4 Contraintes de production et de culture *94*
3.5 Contraintes de temps de travaux et de main d'œuvre *95*
4 Résultats numériques sur un cas concret 96
4.1 Présentation de la ferme étudiée *97*
4.2 Méthodologie de test du programme linéaire et résultats numériques *98*
5 Conclusion et perspectives 102

4 Un modèle stratégique de sélection des clients de fermes maraîchères 105
1 Description du problème de sélection des clients 106
2 Un état de l'art de la sélection des clients et des fournisseurs 108
3 Le modèle de sélection des clients en programmation linéaire mixte 111
3.1 La vente aux marchés de producteurs *113*
3.2 La vente de paniers en Amap *114*
3.3 La vente contractualisée à des entreprises *116*
3.4 La vente à des grossistes *117*
3.5 L'achat-revente de produits d'autres fermes *118*
4 Analyse théorique de la complexité du problème 119
5 Résultats numériques et analyse des performances du programme linéaire mixte 121
5.1 Cas d'études et données *121*
5.2 Méthodologie de test du programme *123*
5.3 Exemple de résultats sur une instance *123*
5.4 Résultats numériques et analyse des performances du modèle *124*
6 Conclusion et perspectives 127

5 Vers un outil opérationnel intégrant les trois modèles développés **129**
1 L'étude de cas concrets pour construire et paramétrer les modèles 130
1.1 Le travail au sein des Fermes de Gally *130*
1.2 Le travail avec les chambres d'agriculture *131*
1.3 Le travail avec un centre de recherche en développement agricole *131*
2 Données sources et interface utilisateur 132
2.1 Données sources *132*
2.2 Interface utilisateur *133*
3 Assemblage et connexion des modèles 134
4 Conclusion et perspectives 135

Conclusion générale **137**

Bibliographie **139**

Annexes **148**
Résultats des instances du chapitre 4 Sélection des clients 149
Publications 153

Introduction

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche regroupant une entreprise agricole et paysagère, les *Fermes de Gally*, et le laboratoire G-SCOP de la Communauté Université Grenoble Alpes. Cette thèse a fait l'objet d'une convention CIFRE [1], financée par l'ANRT [2], et s'est déroulée chez les deux partenaires signataires.

1 L'agriculture urbaine au sein des Fermes de Gally

1.1 D'une ferme francilienne à une entreprise diversifiée autour de la nature en ville

Les Fermes de Gally est un entreprise familiale qui débute son histoire en 1746, quand la famille Laureau commence à cultiver la terre en Ile-de-France (voir figure 1). Dominique et Xavier Laureau reprennent le flambeau familial dans les années 1980, et poursuivent la diversification en

1. Conventions Industrielles de Formation par la REcherche
2. Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, arnt.asso.fr

développant de nouvelles activités liées à la nature en ville depuis les fermes de Gally et de Vauluceau (Laureau et Laureau, 2016).

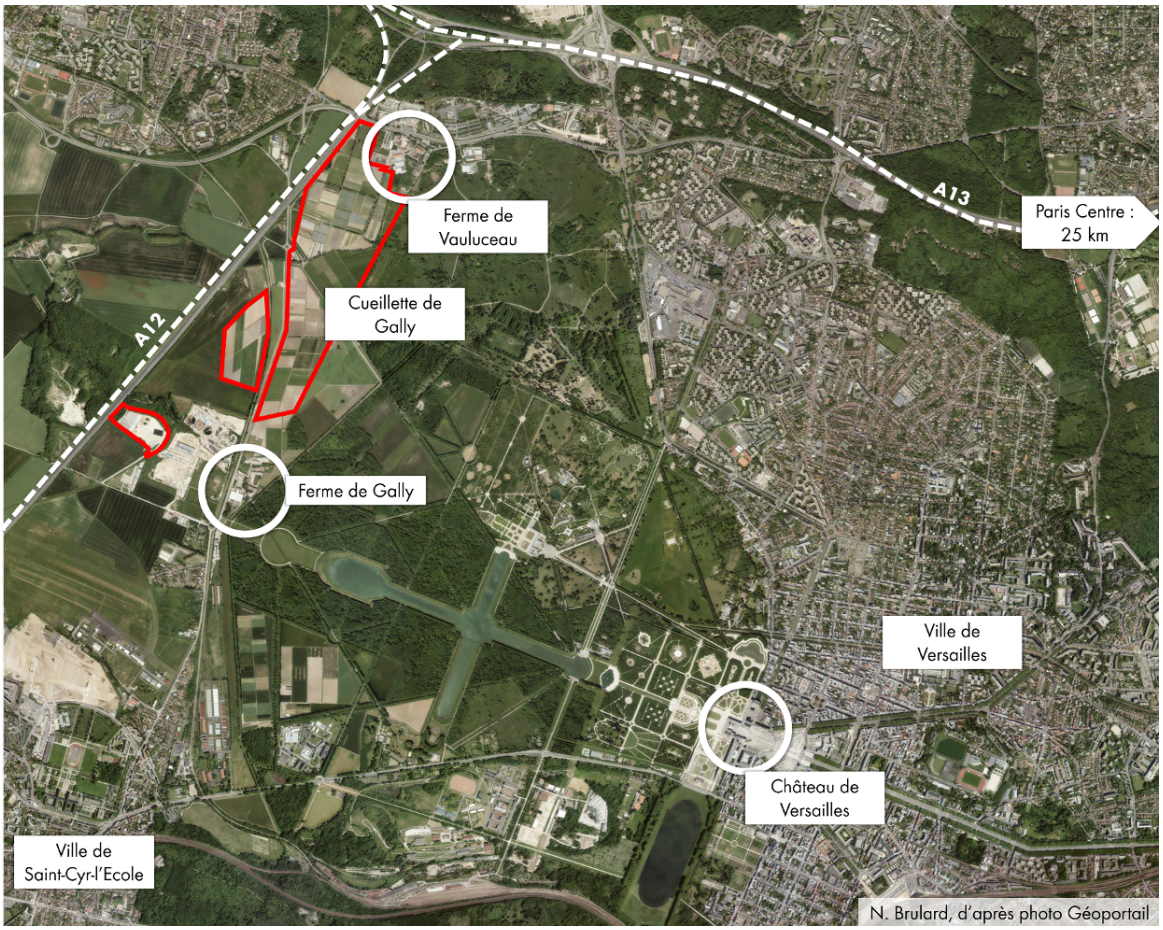


FIGURE 1 – *La situation péri-urbaine des fermes de Gally et de Vauluceau ont permis à l'entreprise Les Fermes de Gally qui les exploite de diversifier ses activités vers un public urbain.*

Dans les années 1960-1970, *les Fermes de Gally* diversifie ses activités par de la production horticole, la création d'une jardinerie et le lancement d'une activité de paysagisme d'entreprise. La création de la marque *Gally* en 1981 marque le début d'un développement d'activités commerciales à destination des consommateurs urbains. En 1984 est ouverte la *Cueillette Libre Service*, une ferme maraîchère où les clients viennent cueillir les produits cultivés par les équipes de la ferme. Le développement des jardineries autour de Paris se poursuit et l'activité de paysagisme prend de l'ampleur notamment par de la croissance externe. En 1994, une ferme pédagogique est ouverte à Saint-Cyr-l'Ecole à destination des écoles et des familles, complétée par des labyrinthes végétaux en 2000 et par une seconde ferme pédagogique en 2005 à Sartrouville.

Accentuant le développement des activités de services, *les Fermes de Gally* crée le *Verger de Gally*, service logistique de livraison de paniers de fruits au bureau pour le bien-être des salariés. En parallèle, le groupe cède 6 de ses 7 jardineries franciliennes. En 2010, le *Bureau d'Etudes de Gally* est créé pour accompagner les projets de paysage d'intérieur et d'extérieur.

L'entreprise a su tirer parti d'une situation péri-urbaine avantageuse, en périphérie du parc du Château de Versailles, pour développer des créer un ensemble cohérent d'activités complémentaires autour d'un même thème : relier ville et campagne. Aujourd'hui, *les Fermes de Gally* rassemble plus de 500 collaborateurs, répartis dans 11 villes de France. Ce sont 150 ha de grandes cultures, 60 ha

de cueillette libre service, 7000m² de surface de vente au public, 70 000m² de pépinières, ateliers et entrepôts.

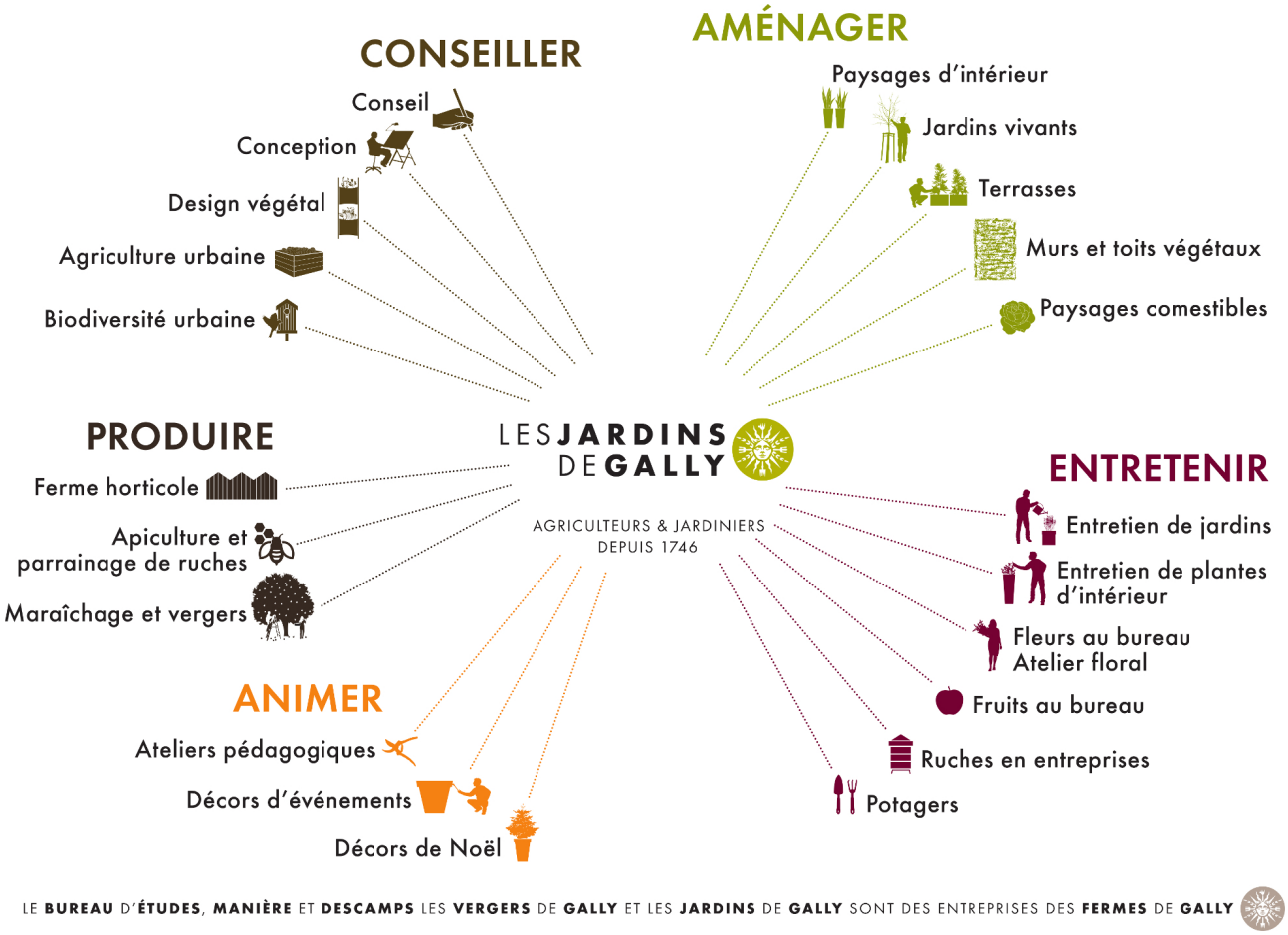


FIGURE 2 – *La diversité des métiers de l'entreprise Gally, au service de la nature en ville*

1.2 Le développement d'une expertise agriculture urbaine : quels usages et quels projets dans des contextes urbains complexes ?

Les Fermes de Gally peut être considérée comme une ferme péri-urbaine diversifiée, qui a su transformer la menace de la croissance urbaine en opportunités économiques. Alliant implication de longue date dans le développement territorial dans les Yvelines, expertise technique dans les métiers de l'agriculture, du paysage et du végétal et connaissance des clients urbains, *les Fermes de Gally* est bien positionnée pour accompagner le développement de l'agriculture urbaine et des circuits courts en Ile-de-France.

Ainsi, le *Bureau d'Etudes de Gally* capitalise sur les compétences acquises par l'entreprise-mère au fil des années, dans les domaines de l'agriculture, de l'éducation à l'environnement, de la distribution spécialisée et du paysage. Le *Bureau d'Etudes de Gally* est aujourd'hui une référence en matière d'expertise et de conseil en agriculture urbaine, mêlant différentes activités (multi-fonctionnalité de l'agriculture urbaine) et imbriquant différentes échelles (parcelle, exploitation agricole, filière, territoire).

Le *Bureau d'Etudes de Gally* vend ses conseils et son accompagnement à des entreprises et des collectivités pour des projets allant du paysage comestible (espaces verts avec des espèces potagères ou fruitières) à la conception de fermes urbaines professionnelles sur des bâtiments, des délaissés urbains ou en sous-sol.

Le terme agriculture urbaine regroupe une multitude de réalité qui peuvent brouiller la compréhension. **Dans cette thèse, nous nous focalisons sur les exploitations agricoles intra- et péri-urbaines professionnelles, dont le but est de générer un revenu pour payer les salaires, les charges et les investissements.** Pour les lecteurs curieux des multiples formes d'agriculture urbaine que nous n'approfondissons ici, nous avons publié les *101 mots de l'Agriculture urbaine* en juin 2016 aux éditions Archibooks, avec Xavier Laureau, Pierre Darmet et Alexis Lefebvre des *Fermes de Gally* (Laureau *et al.*, 2016).

Le sujet de l'agriculture intra-urbaine professionnelle est relativement récent en France et peu de références techniques sont accessibles. *Les Fermes de Gally* a conçu en 2013-2014 un démonstrateur d'agriculture urbaine "Les Fermes en Villes" (figure 3), dans le cadre de la grappe d'entreprises *Le Vivant et La Ville*. Ce projet cherche à démontrer qu'on peut développer une activité agricole viable sur un délaissé urbain, une ancienne décharge de terre abandonnée de 3.5 hectares. L'entreprise exploite aujourd'hui cette ferme autour de trois activités :

— une production agricole hors-sol saisonnée, spécialisée dans des cultures à forte valeur ajoutée commercialisées en circuits courts – fraises, framboises, tomates cerise, aromates, asperges et haricots ;
— une activité de location de jardins potagers à des particuliers ;
— un espace d'expérimentation d'une vingtaine de techniques de culture hors-sol, à la fois support de recherche et de pédagogie à destination d'un public scolaire et étudiant.

Après 3 ans d'exploitations, le projet se rapproche de l'équilibre économique. Le chiffre d'affaires agricole continue de croître et atteint 80 k€ en 2016. L'amélioration technique et commerciale des équipes de production devrait permettre d'atteindre les 120 k€ de chiffre d'affaires, point d'équilibre du projet, d'ici à 2018.

FIGURE 3 – *Le démonstrateur d'agriculture urbaine "Les Fermes en Villes", Saint-Cyr-l'Ecole (78)*

Dans un contexte plus urbain, le *Bureau d'Etudes de Gally* a conçu, avec les membres du *Laboratoire d'Urbanisme Agricole*[3], un projet de hub agricole intra-urbain, la "Fabrique Agricole" (figure 4). Ici encore, l'équilibre économique du projet tient à la combinaison de plusieurs activités : production agricole sous serre, production agricole extérieure, paysage comestible pour les riverains, location d'espace à des entreprises de paysage et commerce de produits agricoles locaux. Ce projet, proposé dans le cadre du concours Réinventer Paris, n'a pas été retenu, mais son concept est applicable dans d'autres contextes.

3. www.lua-paris.com

FIGURE 4 – *La Fabrique Agricole, projet du Laboratoire d'Urbanisme Agricole*

Enfin, nous pouvons aussi parler du projet des Toits Didot, lauréat du concours Parisculteurs en 2016 (voir illustration en conclusion page 137). Dans le cadre d'un projet de rénovation urbaine d'un bailleur social, l'architecte propose l'installation d'une ferme sur le toit. Notre mission de conception consiste à intégrer la complexité technique et économique de faire tenir une ferme sur quatre toits d'un même immeuble et à combiner activités de production, de pédagogie, d'animation du quartier et de location d'espace évènementiel pour atteindre l'équilibre économique de fonctionnement. L'implication d'un groupe de la distribution de quartier a été essentielle pour assurer les débouchés des produits et le financement de l'outil de production.

Ces quelques exemples illustrent bien la diversité des projets et des contextes travaillés par le *Bureau d'Etudes de Gally*, que ce soit pour des clients externes ou pour accompagner les projets agricoles internes aux *Fermes de Gally*. Cette diversité de projets se retrouve dans de nombreuses capitales du monde, comme le montrent les travaux de Despommier (2010), Soulard et Aubry (2011), Chapelle et Jolly (2013) ou encore Pourias *et al.* (2016). Cependant, une même question se dégage : **comment proposer une combinaison d'activités de production et de services, qui tire le meilleur parti des nombreuses contraintes et des opportunités liées à la localisation urbaine, pour définir un modèle économique viable pour ces fermes urbaines ?**

2 Contexte et problématiques pour la conception de fermes urbaines viables

L'entreprise initie une évolution de fond de ses métiers de services, afin de répondre aux besoins des agglomérations urbaines de demain. L'enjeu est de passer du maintien d'espaces à visée principalement esthétique et d'agrément, au management de services écosystémiques et productifs. L'agriculture urbaine, qui mobilise les compétences agricoles et d'éducation à l'environnement, développées par ailleurs par les *Fermes de Gally*, et fait appel à sa force d'innovation, figure parmi les évolutions les plus pertinentes, tant en termes de sens que de marchés potentiels.

Les solutions techniques de culture en ville existent et se développent rapidement au travers de nombreuses initiatives d'associations et d'entreprises, aussi bien en France qu'à l'étranger (Berkel, 2013; Verdonck *et al.*, 2014). Dans un secteur très concurrentiel et en plein essor, les *Fermes de Gally* sont sollicitées par leurs clients pour trouver des modèles économiques assurant la rentabilité des exploitations agricoles urbaines professionnelles. Compte-tenu des contraintes fortes de la production

agricole en ville, les exploitations déjà existantes ne sont que rarement rentables et viables[4]. Le foncier est l'une des contraintes majeures, aussi bien en termes de disponibilité et de coût, que de localisation stratégique et d'organisation logistique entre les sites.

Il s'agira donc de concevoir des systèmes agricoles de production de fruits et légumes frais de qualité en tenant compte des stratégies de production et d'approvisionnement de leurs clients – vente directe à la ferme, restauration collective, grande distribution – et des autres acteurs de la chaîne logistique. Les exploitations urbaines produiront aussi des produits et services non agricoles destinés à différents publics (formation, éducation à l'environnement et l'alimentation, valorisation des déchets organiques, reconnexion monde rural/monde urbain, accès à un loisir vert, services aux entreprises, etc.). Dans le travail présenté ici, nous nous concentrons sur la production agricole et les services ne seront pas développés. Cependant, nos choix de modélisation des différents problèmes sont faits pour permettre d'intégrer les services et les combiner aux activités de production.

La conception de systèmes agricoles urbains peut être vue comme un problème de conception d'un système optimisé de production. Nous cherchons optimiser la complémentarité des activités agricoles et non agricoles pour proposer un modèle viable économiquement du système de production, en fonction des contraintes spécifiques au lieu, des débouchés accessibles et des coûts d'équipements et de main d'oeuvre. Se posera ainsi la question de l'arbitrage entre spécialisation du système de production et diversification des activités.

Notre travail de recherche a pour but d'identifier et d'optimiser les critères et les contraintes de dimensionnement de nouvelles formes de systèmes de production agricoles, incluant biens et services, en zone urbaine. Une problématique majeure sous jacente sera d'optimiser la planification de la production et de la distribution afin de réduire les coûts tout au long de la chaîne de valeur et d'assurer la pérennité de l'ensemble.

Les résultats de cette thèse doivent permettre aux *Fermes de Gally* de disposer des outils, à la fois méthodologiques et pratiques, pour concevoir et mettre en place de telles exploitations agricoles innovantes.

3 Objectifs, démarche et contributions de la thèse

3.1 Objectifs de notre recherche

Cette thèse vise à identifier les conditions de la rentabilité d'une exploitation agricole urbaine commercialisant ses produits dans différents circuits de distribution.

Nous cherchons à mettre en place un outil d'aide à la conception de systèmes de production agricoles urbains combinant production agricole et activités commerciales et de services. Cet outil est à destination des conseillers agricoles ou de bureaux d'études qui accompagnent des projets de développement agricole intra- ou péri-urbain. Nous nous donnons plusieurs objectifs compte-tenu du contexte :

4. Dans tout le document, nous entendons par agriculture urbaine l'agriculture localisée dans la ville et à sa périphérie, dont les produits sont destinés à la ville et pour laquelle il existe des concurrences et des complémentarités entre les usages agricoles et non-agricoles des ressources (Moustier et Mbaye, 1999). Ainsi, la main d'œuvre peut être plus chère en zone urbaine car les travailleurs ont le choix entre l'agriculture et des emplois dans l'industrie ou les services.

— un outil simple d'utilisation et adapté aux contraintes de terrain. Nous visons une rapidité de prise en main et de résolution et une grande clarté des résultats, avec des indicateurs parlant aux professionnels ;
— une structuration des données permettant l'utilisation d'une base de données techniques et économiques pré-remplie, pour une plus grande rapidité d'utilisation ;
— un outil permettant de mêler différentes activités de production agricole et de commercialisation, et à terme, des activités de services ;
— un horizon de planification de 5 à 20 ans, qui correspond aux durées d'amortissement des investissements agricoles et aux différentes phases de développement de l'entreprise agricole ;
— un choix de modélisation qui permet d'intégrer des facteurs non économiques (stratégies, contexte) par le biais de contraintes et de jeux de données spécifiques.

3.2 Démarche suivie dans la thèse

L'entreprise les Fermes de Gally est confrontée à des problèmes variés dans la recherche de modèles techniques et économiques viables pour les activités agricoles intra- et péri-urbaines. Pour cette raison, nous choisissons une modélisation en programmation linéaire mixte avec un solveur commercial (CPLEX) pour l'adaptabilité de cet outil et ses performances de résolution de problèmes complexes. Développer des outils spécifiques aurait été une solution certes moins coûteuse, mais aussi moins évolutive par rapport aux problématiques très changeantes d'un secteur d'activité encore jeune.

Concernant nos fermes urbaines, nous modélisons des décisions à plusieurs échelles temporelles et spatiales, depuis la parcelle jusqu'au lien avec la distribution des produits. Nous pouvons subdiviser notre problème en 3 sous-problèmes considérés indépendants, donnant chacun lieu à un modèle spécifique.

Sous-problème 1 : comment prendre en compte la périssabilité des produits dans le dimensionnement d'une ferme urbaine sur horizon d'un an ? Quel est l'impact de la périssabilité sur la sélection des produits, la sélection des méthodes de culture, la sélection de la main d'oeuvre et des équipements à l'échelle de la ferme ?

Sous-problème 2 : comment gérer la succession pluri-annuelle des cultures à l'échelle de la ferme, en tenant compte des coûts fixes liés à l'installation d'infrastructures et d'équipements pour les différentes cultures et des éventuelles interactions agronomiques entre une culture et la culture suivante ? Comment se complètent et se concurrencent les différentes activités de productions et de commercialisation pour l'utilisation des ressources ?

Sous-problème 3 : comment sélectionner conjointement les clients à desservir et les productions pour répondre à leur demande ? En effet, le producteur ne conduira pas sa ferme de la même façon s'il doit vendre à un grossiste de gros volumes ou fournir des paniers diversifiés toutes les semaines à une multitude de clients individuels.

Enfin, nous nous intéresserons à développer un outil unique pouvant traiter n'importe quelle combinaison de ces 3 sous-problèmes avec leur modèle associé, pour répondre aux enjeux des acteurs économiques, en premier lieu les *Fermes de Gally*.

Nous choisissons de développer notre outil sur la base de la programmation linéaire, outil de la Recherche Opérationnelle très utilisé dans la recherche comme dans les entreprises pour traiter des problèmes complexes de conception de systèmes optimisés de production. La Recherche Opérationnelle - *Operations Research* en anglais - utilise des méthodes scientifiques, essentiellement mathématiques et informatiques, en vue de prendre la meilleure décision possible (Roadef, 2011). Parmi ces techniques, la programmation linéaire consiste à représenter un problème sous la forme d'un modèle linéaire, dans lequel les données et les variables sont liées par des équations ou des inéquations linéaires. La programmation linéaire (PL) cherche à maximiser ou minimiser une fonction linéaire dite fonction objectif (un profit, un revenu, un coût). L'introduction de l'algorithme du simplexe en 1947 par George Dantzig a offert à la programmation linéaire une méthode de résolution efficace de modèles complexes. La programmation linéaire présente l'avantage d'être simple et souple dans la définition du modèle. La programmation linéaire en nombres entiers (PL/NE) désigne les programmes d'optimisation linéaire dont les variables prennent des valeurs entières. Le respect des contraintes d'intégralité rend la résolution du problème plus complexe et nécessite des techniques algorithmiques spécifiques comme les techniques de branchement et séparation (*branch and bound*) ou la méthode des plans sécants (*cutting plan method*). La PL/NE avec sa base mathématique théorique solide et des programmes informatiques de résolution efficaces est aujourd'hui un outil d'aide à la décision communément employé et éprouvée en industriel pour les problèmes de conception et de planification (Roadef, 2011). Dans nos travaux, nous avons principalement recours à la programmation linéaire mixte, combinant des variables booléennes, entières et réelles dans un même modèle.

4 Structure de la thèse et contributions

Ce chapitre introductif présente le contexte de la thèse et ses principaux enjeux pour l'entreprise partenaire. La suite du manuscrit se compose de cinq chapitres.

Le chapitre 1 développe un **état de l'art général** sur l'agriculture urbaine et les problèmes de modélisation et d'optimisation qui s'y rapportent. Il explore les principales problématiques rencontrées dans les filières agricoles des produits frais et la façon dont la recherche y répond. Ce chapitre d'état de l'art précise la définition des systèmes de production agricoles et des concepts auxquels nous nous référons dans la suite. Des états de l'art spécifiques sont présentés dans les trois chapitres suivants pour positionner les problèmes étudiés et les modèles proposés par rapport à la littérature existante.

Nous présentons ensuite dans les chapitres 2, 3 et 4 les trois modèles que nous proposons pour répondre aux objectifs et aux questions des trois sous-problèmes présentés ci-dessus (voir figure 5). Dans le chapitre 2, nous présentons un **modèle de planification tactique** développé en programmation linéaire mixte pour accompagner la **conception de systèmes de production agricole urbains spécialisés en fruits et légumes frais**. Ce modèle permet de combiner différentes méthodes de productions pour plusieurs produits, en prenant en compte la périssabilité avec des pas de temps courts, afin d'obtenir une simulation réaliste du fonctionnement d'une ferme maraîchère. Le modèle se distingue de la littérature par son intégration des décisions tactiques et stratégiques sur un problème multi-produits, multi-techniques et multipériodes, avec stock périssables et prise en compte des temps de travaux. Nous définissons une formulation spécifique pour les itinéraires techniques et les profils de main d'œuvre de la ferme. Nous comparons dans ce chapitre les solutions trouvées par le modèle et les résultats de terrain sur le cas concret d'une ferme urbaine exploitée par les *Fermes de Gally*. Nous réalisons dans ce chapitre une analyse de la complexité théorique

	Modèle de planification tactique	Modèle de dimensionnement stratégique	Modèle de sélection des clients
PARAMETRES DU MODELE			
Horizon temporel	1 an	2 à *n* ans	1 an
Pas de temps	1 jour à 1 semaine	1 semaine à 2 mois	1 jour à 1 semaine
Achat-revente auprès d'autres fermes	*Non considéré*	*Non considéré*	Défini par le modèle
Gestion de la périssabilité	Flux à 2 niveaux : stock au champ et en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide
Caractéristique de la demande	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Structure de demande spécifique à chaque client
DECISIONS A PRENDRE			
Sélection des produits cultivés	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Donnée d'entrée
Sélection des méthodes de production	Définie par le modèle	Définie par le modèle	*Non considérée*
Surface des parcelles	Définie par le modèle	Donnée d'entrée	*Non considérée*
Succession de cultures	*Non considérée*	Définie par le modèle	*Non considérée*
Sélection des profils de main d'œuvre	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Main d'œuvre fixe, intérim possible
Sélection des clients	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Obligation de répondre à l'intégralité de la commande des clients sélectionnés.

FIGURE 5 – *Positionnement des trois problèmes étudiés dans la thèse*

du problème, qui peut être vu comme un problème de sac-à-dos multidimmensionnel et multichoix, combiné à un problème de flot pour prendre en comte la production et le stockage de produits périssables. Deux pré-traitements sont proposés pour améliorer la résolution du modèle.

Dans le chapitre 3, nous proposons un modèle d'aide au **dimensionnement et la planification stratégique** des investissements matériels et humains pour maximiser le revenu agricole pluri-annuel d'une ferme maraîchère en réponse à des demandes connues de clients. Ce modèle en programmation linéaire mixte intègre les coûts et les temps liés à l'installation des infrastructures productives, telles que les serres, les tunnels ou les réseaux d'irrigation. Il intègre aussi la gestion des stocks périssables ainsi qu'un délai minimal avant le retour d'une plante de même famille botanique sur une parcelle pour prendre en compte les contraintes agronomiques. De la sorte, notre modèle innove en permettant de combiner des itinéraires techniques en pleine terre et des itinéraires techniques hors-sol sur une même exploitation. Nous présentons l'analyse du cas concret sur un projet de transformation d'une ferme horticole en ferme maraîchère dans les Yvelines.

Dans le chapitre 4, nous présentons un modèle pour aider les maraîchers à **sélectionner la combinaison de clients la plus rentable pour valoriser la production périssable** de la ferme compte-tenu de ses ressources, des caractéristiques de la demande des clients et de la possibilité de pratiquer l'achat-revente auprès d'autres fermes. Notre modèle permet de sélectionner, non pas les clients les plus rentables indépendamment, mais la combinaison de clients la plus profitable, en tenant compte du caractère périssable des fruits et légumes frais. En outre, il intègre les coûts et temps de main d'œuvre liés à la livraison des différents clients, afin de comparer les clients à la marge qu'ils permettent d'obtenir et non au chiffre d'affaires générés. Notre principale contribution est la caractérisation fine de la structure de la demande de différents types de clients et la modélisation de la réponse de la ferme à ces demandes en produits périssables. Un cas concret est présenté, ainsi qu'une analyse des performances du modèle.

Dans le chapitre 5, nous abordons la question de la confrontation de l'approche de modélisation avec la réalité des problématiques de terrain. Outre la description de cas concrets pour valider nos modèles et le développement d'une interface utilisateur, nous présentons une **approche de mise en relation des trois modèles présentés** pour proposer un outil d'aide à la décision répondant globalement au problème de dimensionnement de ferme maraîchère. Nos principales contributions sont ici la définition de formats de données et de jeux de données pour différents cas concrets, ainsi que le développement d'une interface homme-machine destinée à faciliter l'utilisation de l'outil par les conseillers agricoles.

Nous terminons ce manuscrit par un chapitre de **conclusion** et de discussion sur les perspectives de recherche pour la suite des travaux sur les problématiques abordées.

1 L'aide à la décision stratégique et tactique pour les systèmes de production maraîchers urbains et les circuits courts : un état de l'art

Résumé du chapitre

Les modèles et les outils d'aide à la décision sont des moyens économiquement intéressants pour évaluer l'impact d'un changement, d'une innovation dans une ferme ou dans une chaîne logistique agro-alimentaire. Moins coûteux et moins chronophages qu'une recherche par tâtonnement et par essais-erreurs sur des systèmes réels, souvent partiels, ils permettent de considérer différents niveaux de décision et différentes échelles, de la plante à la filière globale. De nombreux auteurs regrettent l'absence d'approche globale qui pourraient traduire l'interdépendance des activités et des acteurs au sein d'une filière. L'approche intégrant production-distribution comble en partie ce manque en liant des décisions de production, notamment la planification de la récolte, avec des actions de l'aval de la filière, comme la gestion du stockage et de la distribution en réponse à des demandes de clients. Cependant, les modèles globaux sont complexes à mettre en place et à valider. La compréhension des vrais besoins des producteurs et de leurs conseillers est fondamentale et l'implication de ces acteurs est souhaitée.

Nos recherches s'inscrivent dans le contexte de l'agriculture urbaine et s'intéressent à l'impact du lien ville-campagne sur le dimensionnement des systèmes de production. Nous présentons dans ce chapitre le contexte de l'agriculture urbaine et les principales approches de modélisation qui peuvent s'y appliquer, afin d'éclairer le lecteur sur les enjeux de notre travail et les partis pris de nos modèles par la suite.

1 Une agriculture urbaine en pleine croissance, à la recherche d'un modèle économique

Depuis une dizaine d'année, l'agriculture urbaine est la nouvelle mode dans nos pays : nouveau loisir des urbains en manque de nature, nouveaux métiers pour des entrepreneurs en quête de sens, nouveau vecteur de marketing territorial des collectivités. Cependant, l'agriculture urbaine n'est pas aussi récente ni aussi en rupture que ne le laissent souvent penser ses promoteurs.

1.1 Agriculture, alimentation et ville : définitions, tendances, enjeux

Le poids du secteur agricole dans l'économie décroit depuis deux siècles, transférant main d'œuvre et capital vers l'industrie et les services (Berthelier et Lipchitz, 2005). En 2015, le secteur agricole produit 4% de la valeur ajoutée mondiale, loin derrière l'industrie (28%) et les services (68%) (Banque Mondiale, 2016). L'agriculture emploie entre 50 et 60% de la population active mondiale, principalement dans les régions pauvres où se maintient un fort taux d'agriculture de subsistance (FAO, 2015). En France, la part de l'agriculture n'a cessé de décroitre (figure 1.1) avec le développement de l'industrie et des services, malgré l'importance des enjeux agricoles et alimentaires actuels. La valeur ajoutée des productions agricoles est en partie captée par l'industrie agroalimentaire et les intermédiaires logistiques et commerciaux.

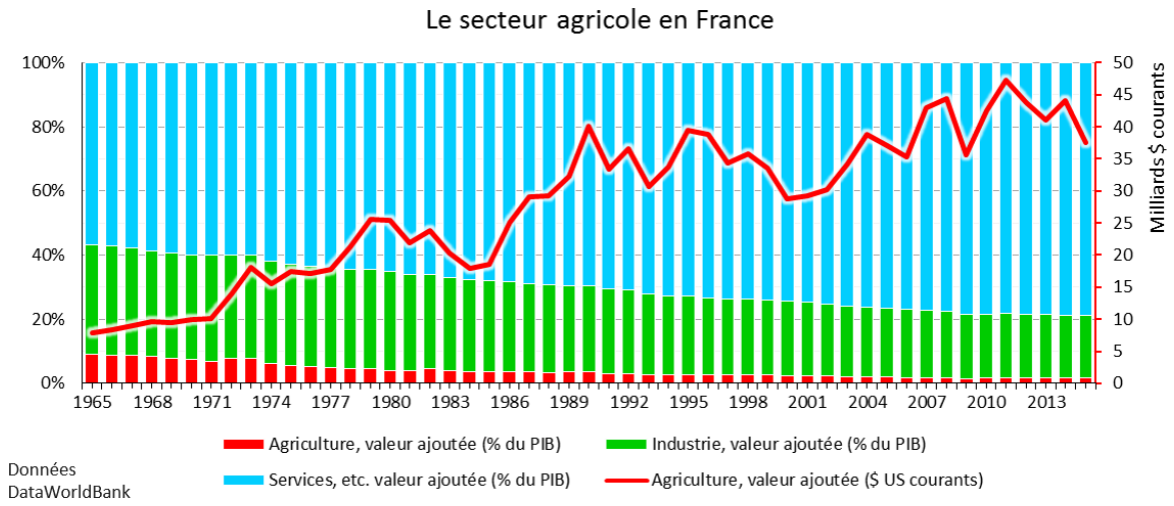


FIGURE 1.1 – *Le poids relatif du secteur agricole dans l'économie française ne cesse de décroître depuis deux siècles. Représentation des 50 dernières années, d'après données Banque Mondiale (2016)*

Nous introduisons ici le contexte agricole et alimentaire pour clarifier les termes et références que nous utiliserons dans ce manuscrit. Certains paragraphes de présentation du contexte sont repris

ou adaptés du livre *Les 101 mots de l'agriculture urbaine*, que j'ai co-écrit avec Xavier Laureau, Alexis Lefebvre et Pierre Darmet (Laureau *et al.*, 2016).

Une définition de l'agriculture

Originellement, l'agriculture désigne le travail du champ (*ager* en latin) par l'homme pour produire les végétaux et animaux qui lui sont nécessaires. Au cours de l'histoire, les hommes ont appris à connaître leur environnement et à l'adapter, le transformer pour en tirer nourriture, fibres et énergies (Mazoyer et Roudart, 2002).

Pour obtenir des produits végétaux, les paysans ont appris à gérer la fertilité du sol. Grâce à la photosynthèse, les plantes captent du gaz carbonique atmosphérique et des nutriments du sol, qui sont ensuite exportés hors du champ à la récolte. Le paysan doit entretenir durablement la fertilité de son sol, en jouant sur les mécanismes de renouvellement des minéraux du sol. Ainsi, il peut épandre et incorporer au sol du fumier (déjections animales et paille). Il peut aussi mettre en place des rotations de cultures incluant des plantes qui fixent l'azote de l'air (légumineuses) ou qui, par leur enracinement profond, vont explorer les couches profondes du sol et remonter des minéraux en surface. Au delà de la gestion de la fertilité, les pratiques de culture doivent permettre de limiter le développement des adventices (plantes non désirées), des maladies et des ravageurs. Les paysans limitent la « pression sanitaire » en sélectionnant les variétés les plus résistantes et en mettant en place des stratégies de lutte. L'alternance de cultures, ou rotation, de différentes familles botaniques sur plusieurs années limite le développement d'une année sur l'autre des maladies et des ravageurs. La rotation peut aussi limiter la prolifération des adventices en cultivant des plantes concurrentes, par exemple des plantes couvre-sol.

Depuis le XIXème siècle, les agriculteurs externalisent de plus en plus les enjeux présentés ci-dessus, se basant sur l'industrie et les transports à grande distance pour acheminer engrais et pesticides. La fertilité est apportée par des engrais issus de l'industrie pétrochimique. Les produits phytosanitaires limitent le développement des adventices, des maladies et des ravageurs. Les semenciers sélectionnent des variétés à haut potentiel de rendement pour maximiser l'efficience des doses d'engrais apportées. Ces innovations technologiques, la "Révolution Verte", ont permis la simplification des systèmes de production. Les cultures diversifiées en rotation et le lien agriculture-élevage n'est plus essentiel dans l'élaboration du rendement. Les exploitations agricoles se sont agrandies, accompagnant la dynamique de l'exode rural, et ont investi dans des équipements de plus en plus spécialisés. Ce type d'agriculture, aujourd'hui appelé agriculture conventionnelle, s'est généralisé depuis les années 1950, poussé par des politiques publiques d'incitation à la production pour nourrir la population après la Deuxième Guerre Mondiale.

Cependant, cette agriculture dite conventionnelle se base sur des modèles standards et s'adapte mal aux spécificités de chaque environnement et de chaque écosystème. Elle provoque dans de nombreuses situations des pollutions par les engrais (notamment les nitrates) ou les produits phytosanitaires, ainsi qu'une destruction de certains écosystèmes.

L'agriculture biologique a vu le jour au milieu du XXème siècle en opposition à cette agriculture conventionnelle. Le terme agriculture biologique regroupe plusieurs approches qui se rejoignent sur l'interdiction (ou la forte limitation) de l'usage de substances de synthèse (engrais, phytosanitaires, médicaments). Les agriculteurs biologiques cherchent à combiner les avancées scientifiques et technologiques (variétés, matériels, informatique agricole) à des systèmes de production intégrés à

leur environnement (rotation des cultures, liens agriculture-élevage, prise en compte des spécificités locales).

Les préoccupations environnementales de nos sociétés modernes impactent l'agriculture conventionnelle et de nouvelles approches sont développées par les agriculteurs, comme l'agriculture raisonnée, l'agriculture écologiquement intensive, l'agriculture de conservation, l'agro-écologie, etc. À des degrés variés, ces approches visent à reconnecter le système de production à son environnement en prenant mieux en compte les risques sanitaires, les types de sol, les interactions entre le champ cultivé et les haies, mais sans renoncer aux gains de productivité permis par les engrais et produits phytosanitaires de synthèse. L'agriculture assure également des fonctions environnementales. Le secteur agricole modifie en permanence ses pratiques pour répondre aux attentes de la société en ce début du XXIème siècle qui souhaite plus de nature, plus de paysages pittoresques, plus de *local* ; des produits bons, sains et des prix justes. Mais l'agriculture reste un secteur économique fortement dépendant des aléas naturels : climat, insectes, interactions entre processus biologiques, etc.

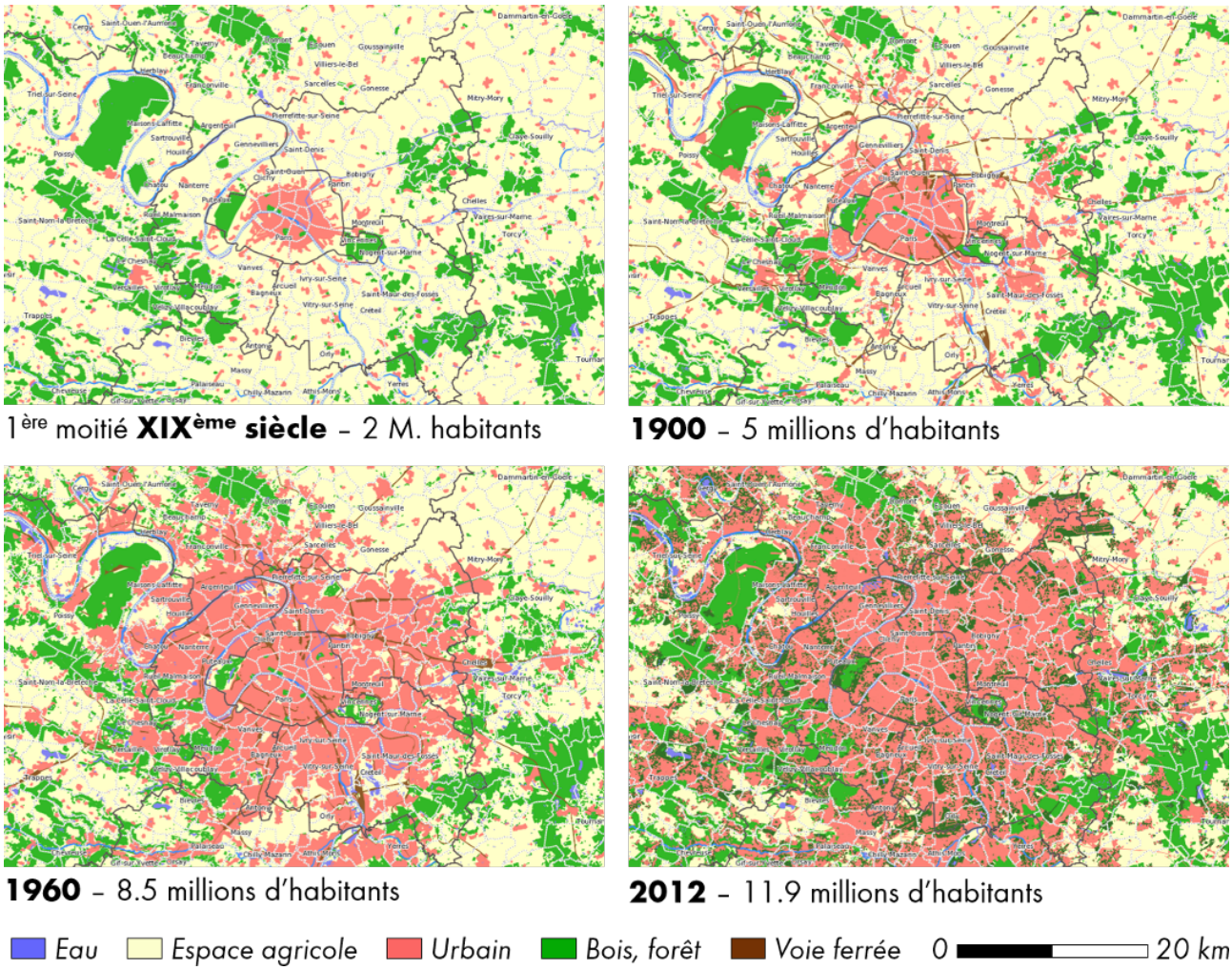


FIGURE 1.2 – *Les espaces agricoles péri-urbains sont les premiers consommés par la croissance des aires urbaines. Exemple de la région parisienne (d'après iau-idf.fr)*

Agriculture et ville se construisent conjointement

Dans l'histoire de l'humanité, les villes ont pu se développer lorsque l'augmentation de la productivité agricole a permis de nourrir plus de personnes par travailleur, et ainsi autorisé des groupes de villageois à se soustraire aux activités de production pour se consacrer à des activités de négoce ou d'artisanat. Si la vie sociale et économique de l'espace rural est centrée sur la production agricole, celle de l'espace urbain, bâti et dense, s'organise autour de fonctions urbaines telles que l'artisanat ou l'industrie, le commerce, l'administration, le politique et les fonctions intellectuelles (Wallon *et al.*, 1992). Les villes, d'abord clairsemées dans la campagne et de faible taille, vont connaître un développement rapide au XXème siècle. Leur croissance se poursuit au dépend de terres agricoles parmi les plus fertiles, celles sur lesquelles les communautés agricoles avaient pu se développer. La croissance urbaine consomme préférentiellement des espaces péri-urbains (figure 1.2). En Ile de France, l'urbanisation a consommé plus de 12% de terres agricoles (18% en petite couronne) et moins de 1% d'espaces forestiers entre 1990 et 2003 (Aubry, 2013). Entre 2006 et 2012, même si l'on note un ralentissement de l'artificialisation [1] des sols, plus de 87% des territoires nouvellement artificialisés (87 000 hectares en 6 ans) sont prélevés sur des territoires agricoles (Janvier *et al.*, 2015). L'agriculture péri-urbaine est la plus touchée par ce phénomène, principalement les systèmes de production de fruits et légumes.

En effet, selon la théorie établie par J.H. von Thünen, décrite par Huriot (1994), les productions de fruits et légumes frais sont traditionnellement implantées à proximité immédiate des centres urbains. Selon von Thünen, le producteur cherche à maximiser le profit qu'il peut tirer de sa terre et ajuste l'intensité de son travail et le type de production selon sa distance à la ville. Les productions se spécialiseraient ainsi en cercles concentriques, c'est la théorie de l'équilibre spatial et de la localisation optimale (Lucas et Chhajed, 2004), présentée sur figure 1.3. Les produits très périssables et pondéreux proches de la ville (fruits, légumes et lait), puis la forêt pour production de bois de chauffage, puis les cultures céréalières et l'élevage allaitant (Huriot, 1994). Le développement des transports et de la réfrigération au XIXème siècle contredit cette théorie et les maraîchers et horticulteurs péri-urbains ne sont plus indispensables à une ville qui s'approvisionne de plus en plus loin. Pour survivre face à l'urbanisation, ils développement des nouveaux systèmes de production de cultures commerciales à destination de la ville (Phlipponeau, 1956).

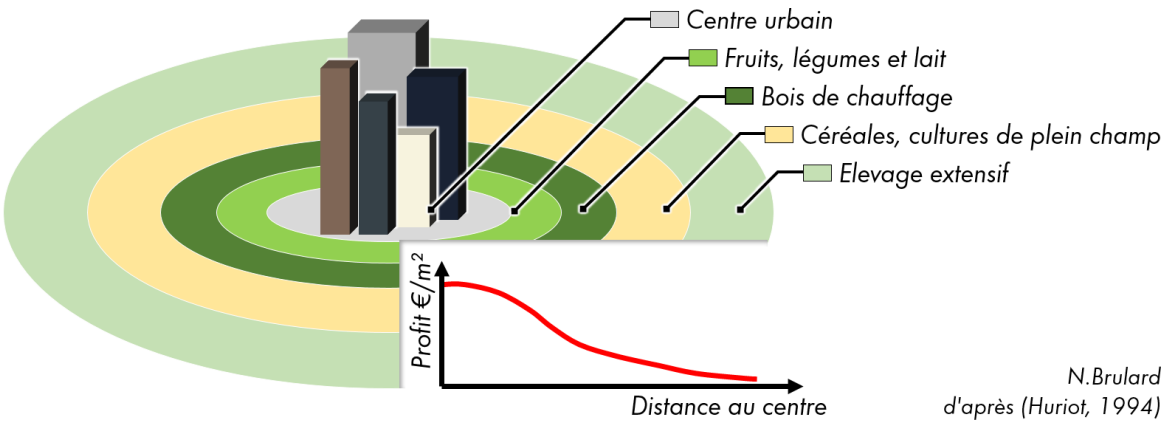


FIGURE 1.3 – *La spécialisation spatiale des productions agricoles en fonction de la distance au centre urbain*

1. Artificialisation : perte irréversible des capacités du milieu naturel à abriter des cyles physico-chimiques et biologiques auto-entretenus, comme le cycle de l'eau, du carbone, de l'azote. Ici, l'artificialisation est conséquence des aménagements humains : construction de la ville, infrastructures, éclairage, etc.

L'approvisionnement des villes en denrées alimentaires à bas prix a toujours été un enjeu stratégique pour les gouvernements, afin de garantir la paix sociale et maintenir des salaires bas dans les autres secteurs d'activités (Mazoyer et Roudart, 2002). La banlieue, *superficie à distance convenue entre les habitants des villes et ceux de la campagne*, assure la sécurité alimentaire des villes qu'elles entourent (Phlipponeau, 1956) : *Ce sont ses cultivateurs qui, après avoir travaillé tout le jour "emploient leur nuit à se rendre sur les marchés de la capitale, pour contribuer, en y apportant leurs denrées, à y entretenir cette abondance continuelle, objet de l'étonnement de quiconque réfléchit".* (Darigand, cité par Phlipponeau (1956)). Ainsi, 81% des fruits et légumes vendues aux Halles de Paris en 1895 proviennent de l'Ile-de-France, contre 46% en 1950 et seulement 2% en 2010 au Marché d'Intérêt National de Rungis (de Biasi *et al.*, 2015a).

Dès lors que l'espace rurale péri-urbain n'est plus indispensable à l'alimentation des villes, la population urbaine pense la campagne d'abord comme un paysage. Comme le notent Hervieu et Viard (2011), *c'est poser catégoriquement une inversion des priorités dans l'aménagement de ce qui n'est pas la ville, c'est considérer le travail de la terre comme un élément qui n'a pas toute légitimité pour bousculer l'organisation des espaces, c'est affirmer que le regard prime sur la production*. Les défis sont encore nombreux pour que l'agriculture péri-urbaine retrouve une légitimité existentielle.

Villes et campagnes sont intimement liées et continuent à se co-construire. Mais les années 2000, l'agriculture intra-urbaine supplante l'aménagement péri-urbain dans les discours médiatiques et politiques.

FIGURE 1.4 – *L'agriculture péri-urbaine face à l'expansion urbaine. Photographie d'Alexa Brunet, dans son travail Dystopia (www.alexabrunet.fr)*

L'agriculture urbaine, les agricultures urbaines

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2015), jusqu'à 70 % des ménages urbains peuvent participer à des activités agricoles dans des pays comme le Vietnam ou le Nicaragua. L'agriculture intra- et péri-urbaine fournirait 15 à 20 % de la production alimentaire mondiale. Pour des populations urbaines précaires, l'agriculture urbaine apporte une alimentation indispensable, en quantité comme en diversité, dans les pays du Sud comme du Nord. Ainsi, à Detroit aux Etats-Unis, toute une filière de production et de distribution agricole s'est recréée pour faire face à la pauvreté et aux déserts alimentaires. L'agriculture urbaine apporte aussi de nombreuses aménités en créant de l'emploi et des revenus et augmentant la résilience des villes aux aléas climatiques (Pribadi et Pauleit, 2016). L'agriculture urbaine dans les zones défavorisées est une réalité économique, une réalité urbanistique, une réalité sociale.

Dans les régions riches, la mode de l'agriculture urbaine n'a qu'une dizaine d'année, mais elle puise ses racines dans des pratiques anciennes. Dès le Moyen-Âge, les citadins jardinaient à la sortie des villes ou dans les parcs urbains pour assurer leur subsistance (Ernwein, 2015). L'agriculture intra-urbaine se construit aujourd'hui dans les métropoles occidentales sur la base d'une culture urbaine méconnaissant la réalité du monde agricole, de son travail, de *ses liens à la solitude ou aux aléas climatiques* (Hervieu et Viard, 2011).

Dans ce manuscrit, nous nous basons sur la définition de l'agriculture urbaine de Mougeot (2000), définition de référence pour nombre d'acteurs et de chercheurs. Selon lui, l'agriculture urbaine est une activité localisée dans une ville ou une metropôle (intra-urbaine) ou à sa périphérie (péri-urbaine), qui cultive ou élève, transforme et distribue une diversité de produits alimentaires et non alimentaires, (ré-)utilisant amplement des ressources humaines et matérielles, des produits et des services trouvés dans et autour de l'aire urbaine, et en retour fournissant des ressources humaines et matérielles, des produits et services à l'aire urbaine. Cette définition a l'avantage de se focaliser sur les fonctions, les usages, plus que sur la localisation. En effet, des fermes intra-urbaines et péri-urbaines peuvent avoir des systèmes de production similaires. L'agriculture péri-urbaine, si elle entretient des liens fonctionnels et réciproques avec la ville, entre donc dans cette définition et participe à la formation du territoire urbain (Fleury et Donadieu, cités par Bonnefoy (2016)).

L'agriculture urbaine prend donc des formes variées selon la nature de ses liens avec la ville et les publics ciblés. Dans la suite de ce manuscrit, nous entendrons par agriculture urbaine l'agriculture intra- et péri-urbaine, sauf mention explicite d'un de ces préfixes.

1.2 Les spécificités et les enjeux des fermes urbaines que nous étudions

Une diversité d'agricultures urbaines

Les systèmes de production agricoles urbains se caractérisent par une forte intensité en travail et en capital sur de faibles surfaces pour obtenir des produits à forte valeur. Ciblant une demande urbaine rémunératrice, les producteurs investissent pour s'affranchir des aléas naturels : utilisation d'abris, engrais urbains ou forçage des cultures (Hervieu et Viard, 2011). L'agrosystème développé est très artificiel. Le foncier est une ressource rare et chère en contexte urbain, tant les usages y sont concurrents. La spéculation immobilière et le mitage des parcelles exercent des pressions fortes sur les exploitations, dans les pays développés comme dans les pays en développement.

Dans de nombreux pays en développement, l'agriculture urbaine est une réalité économique : elle nourrit la ville et les ménages urbains. L'agriculture urbaine assure un revenu (monétaire ou non) ou un complément de revenu à de nombreuses familles pauvres. Dans des zones urbaines où l'emploi urbain ne peut compenser l'exode rural, l'auto-production agricole urbaine fournit des produits plus diversifiés, plus frais et en plus grande quantité que ce que les familles pourraient acheter. Elle participe ainsi à la sécurité alimentaire et à l'équilibre nutritionnel des populations. Les pratiques agricoles urbaines impliquent parfois des risques : contamination des cultures par des eaux souillées, pollution des eaux par les produits phytosanitaires, transfert de métaux lourds du sol aux plantes, etc. Mais l'agriculture urbaine n'en reste pas moins un formidable levier de développement économique, sanitaire et social dans de nombreux pays en développement.

FIGURE 1.5 – *L'agriculture au coeur de la ville de Wa, Ghana : manguier et marché aux animaux*

La mode de l'agriculture urbaine est récente (années 2000) dans les pays industrialisés et met souvent l'accent sur des pratiques ludiques, pédagogiques ou environnementales. Nombre de fermes urbaines récentes se développent sur un constat commun : la population mondiale est de plus en plus urbaine, l'accès à une alimentation en quantité et en qualité est un enjeu majeur des années à venir et l'agriculture motomécanisée et basée sur les intrants chimiques telle que pratiquée dans de nombreuses régions du monde détruit rapidement l'environnement. L'agriculture urbaine serait une solution à ces maux, en fournissant une alimentation locale, saine et durable sur des sols déjà artificialisés (Fesquet, 2013). Maintenir et de développer des exploitations agricoles professionnelles dans et à proximité des villes est donc un enjeu majeur. Se posent alors les questions essentielles du choix des systèmes de production, de leur localisation et de leurs objectifs pour préserver ou développer l'agriculture urbaine (Pribadi et Pauleit, 2016).

Plusieurs visions de l'agriculture urbaine se côtoient, s'affrontent ou s'associent. D'une part, l'agriculture urbaine citoyenne, participative, qui s'illustre par des formes fixes comme les jardins partagés, les jardins collectifs, les jardins familiaux ou des formes plus libres comme les *guérillas jardinière*s ou les *Incroyables Comestibles*[2] (Ernwein, 2015). Des individus, des familles, des associations cultivent de petites parcelles comme une activité de loisir ou comme une source de revenu non monétaire complémentaire.

D'autre part, l'agriculture urbaine entrepreneuriale, où des porteurs de projets agricoles cherchent à s'installer à proximité ou dans les villes pour y produire et y vendre, en restant dans leur milieu culturel fondamentalement urbain. Ils portent des projets intégrant une dose d'utopie, parfois très audacieux et osant mélanger des approches et des métiers inattendus. Mais les surfaces adaptées à

2. http ://lesincroyablescomestibles.fr

l'agriculture urbaine rentable leur sont difficiles d'accès (coûts élevés, barrière pour les individuels, préférences pour les grosses entreprises) et ces entrepreneurs se contentent souvent de terrains peu favorables. On retrouve dans ce contexte ce que disaient Mazoyer et Roudart (2002) quant à la difficulté pour un nouveau paysan de concurrencer les exploitants établis et riches de leur patrimoine : *En économie paysanne, la loi de répartition des fruits du travail est plus proche de "à chacun selon son héritage" que de "à chacun selon son travail"*. On inclut ici l'agriculture péri-urbaine gagnée par la ville.

Enfin, l'agriculture urbaine « néolibérale », où les fermes en toiture et autres potagers en pied d'immeuble servent à augmenter la valeur des actifs immobiliers (bâtiments, quartiers), sous prétexte de répondre à une « demande sociale » de nature en ville (Ernwein, 2015). L'agriculture urbaine a intégré le marketing territorial de métropoles comme Paris pour mettre en avant le bien-être de la vie urbaine (Ulaga *et al.*, 2002). Pour Ernwein (2015), *la ville, enfin, apparaît comme une actrice de la néolibéralisation en tant que partie prenante d'un marché concurrentiel des métropoles. Cette ville entreprenante et concurrentielle, cherchant à se positionner dans un système national et international compétitif, est qualifiée par différents auteurs de ville entrepreneuriale. [...] Implanter un potager urbain, c'est aussi implanter volontairement un type de public et un type d'usagers, et en éloigner d'autres.*

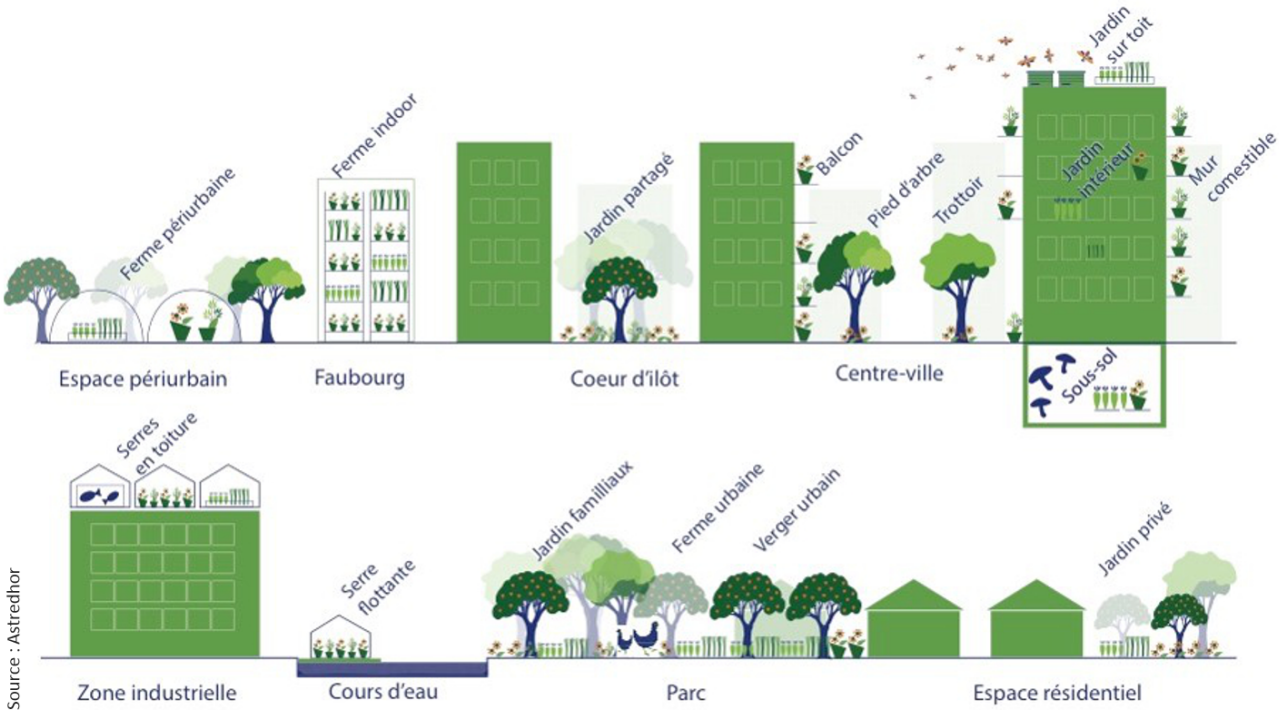


FIGURE 1.6 – *L'agriculture urbaine regroupe une diversité de réalités en termes de localisation, de dimensions, de types d'acteurs impliqués, de choix de production et de distribution, de modèles économiques*

La multifonctionnalité à la base des modèles économiques

Dans les pays développés, l'agriculture urbaine a souvent plusieurs finalités. Des projets associatifs combinent la production agricole à la production de lien social, à la sensibilisation à l'alimentation, à la création d'un paysage et d'un cadre de vie (Duchemin *et al.*, 2010). Des projets privés

associent production commerciale, activités pédagogiques ou prestations d'études. Cette multifonctionnalité n'est pas l'apanage de l'agriculture urbaine, de nombreux agriculteurs en milieu rural se diversifient en louant des gîtes ruraux ou en organisant des événements sur leur ferme. Mais en ville, la multifonctionnalité est souvent vitale, car la surface est souvent trop limitée et les contraintes de construction trop fortes pour développer une unique activité de production viable. Combiner la production avec d'autres activités, plus rémunératrices, équilibre le bilan économique et diminue les risques.

La ville provoque aussi la multifonctionnalité en permettant la rencontre, le croisement de personnes aux parcours, aux profils, aux compétences très variés. Les réseaux y sont plus denses qu'en milieu rural et la fertilisation croisée des compétences génèrent des projets hybrides, portraits de leurs fondateurs et du quartier où ils s'implantent.

On dissocie généralement multifonctionnalité qui s'applique aux activités développées souvent en direction d'un public cible défini (atelier pédagogique, accueil évènementiel), et services écosystémiques ou aménités [3], qui désignent les bienfaits plus globaux des activités sur l'environnement ou la société (dépollution de l'air, réduction de l'effet d'îlot de chaleur ou accueil de biodiversité).

Le lien production-distribution et les circuits courts

La ville a soif d'agriculture et la recherche de liens et de produits de proximité devient une exigence sociétale. En Île-de-France, l'agriculture ne participe plus qu'à 20 % de l'alimentation régionale et elle est placée sous le feu des demandes pressantes, et parfois contradictoires, des consommateurs, des défenseurs de l'environnement et des politiques. Les circuits courts sont depuis longtemps liés à la ville. Comme le présente Ferrières (2002), deux filières du manger co-existent déjà au Moyen-Âge. Le circuit est nécessairement court pour les ruraux qui connaissent l'origine de ce qu'ils consomment, qu'ils le produisent ou qu'ils y accèdent par des circuits de proximité. Les urbains sont souvent des consommateurs passifs, très éloignés des sources d'approvisionnement, ravitaillés par les campagnes environnantes par différents intermédiaires. Un modèle de consommation tout à fait différent : les citadins ne savent pas ce qu'ils mangent et ne mangent plus la même chose que les ruraux.

Il existe aujourd'hui de multiples filières pour commercialiser les produits de l'agriculture. Les agriculteurs adaptent leur système de production pour cibler un ou plusieurs marchés. Commercialiser en circuits courts impose souvent une production diversifiée et étalée dans le temps ; le producteur doit prendre en compte des temps importants de commercialisation, et parfois de lavage, parage et transformation des produits. À l'inverse, en filière longue, on recherche des lots de produits uniformes, de qualité homogène, adaptées aux étapes de transport, stockage, transformation industrielle et commercialisation ; les producteurs sont incités à se spécialiser pour fournir de grands volumes à bas coût.

Les circuits courts désignent "un mode de commercialisation des produits agricoles qui s'exerce soit par la vente directe du producteur au consommateur, soit par la vente indirecte, à condition qu'il n'y ait qu'un seul intermédiaire" (de l'Agriculture, 2010). Les marchés de producteurs, les magasins de producteurs, la vente directe en Amap, les Drives fermiers, "la Ruche qui dit oui" sont des modes de circuits courts. Des produits transformés peuvent être vendus en circuit court. S'il y

3. Aménité : les attributs, naturels ou façonnés par l'homme, liés à un espace ou à un territoire et qui le différencient d'autres espaces ou territoires qui en sont dépourvus. Des travaux récents cherchent à quantifier et valoriser ces attributs subjectifs, tels que la beauté, le calme, l'agrément **?**.

a transformation à la ferme ou dans de petites unités de transformation, on parle aussi de filière courte, en opposition aux filières longues (longue distance, chaînes logistiques importantes, . . .). Une certaine proximité géographique est sous-entendue, mais pas systématique comme le montre la carte de l'origine des produits des Amap (figure 1.7) réalisée par de Biasi *et al.* (2015b).

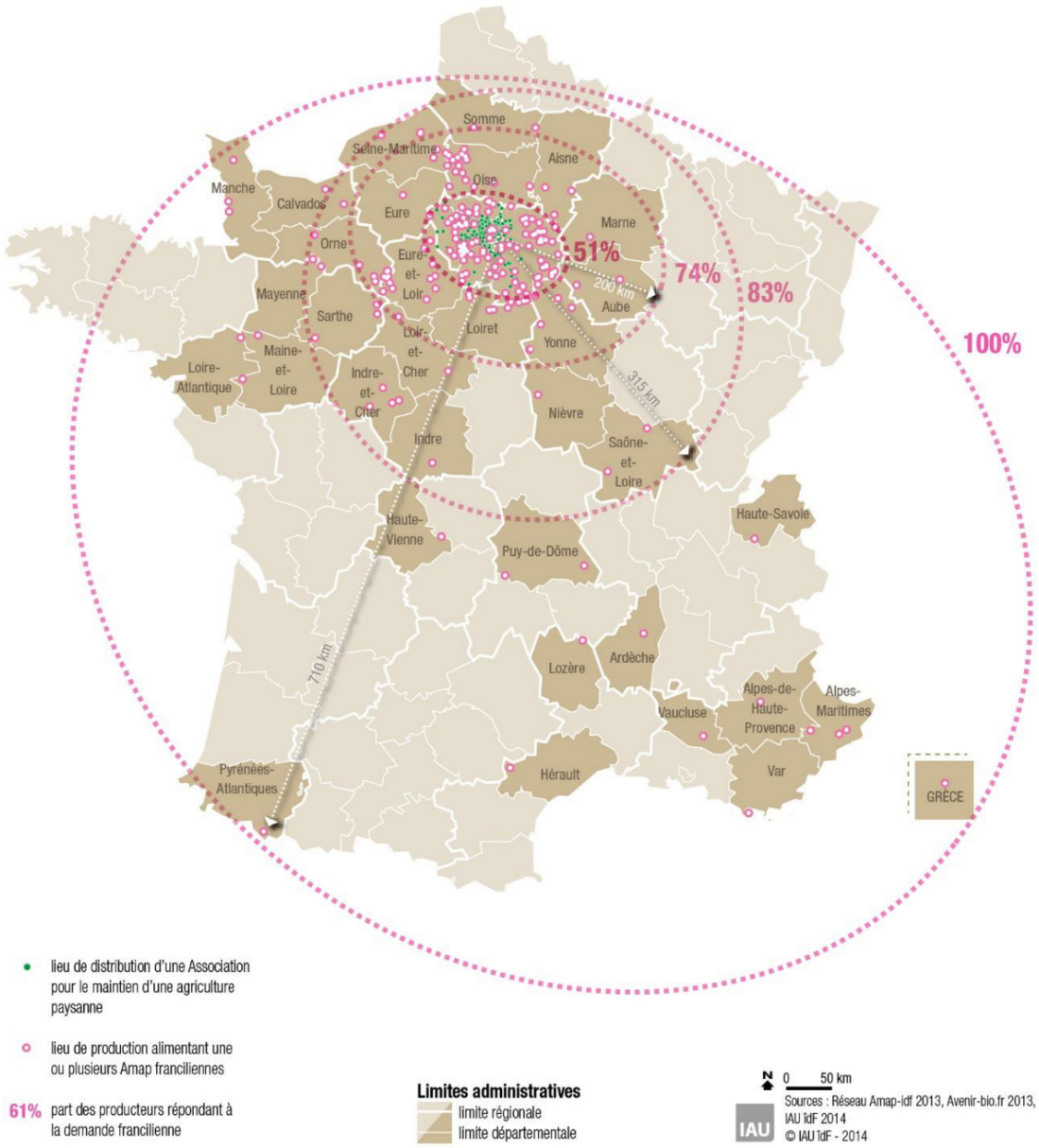


FIGURE 1.7 – *L'approvisionnement des Amap d'Ile de France source (de Biasi* et al.*, 2015b)*

D'autres termes voisins sont utilisés : les circuits locaux ou de proximité qui mettent plus en avant la distance géographique entre la production et/ou la transformation et la consommation. Mais cette définition peut être beaucoup plus subjective : la localité se définit-elle dans un rayon de 25 km, de 100 km, de 200 km, à l'échelle d'une région, d'un pays ? La proximité est-elle la même pour tous les produits ? La proximité est aussi vue sur le plan humain : c'est la proximité entre le producteur et le consommateur, base de la confiance dans le produit et dans les pratiques agricoles (Merle et Piotrowski, 2012). Un magasin qui affiche le lieu d'origine des produits, le nom du producteur ou qui organise des événements faisant intervenir ses producteurs peut rentrer dans cette définition de circuits de proximité.

Aux États-Unis, des fermes urbaines de grande taille exploitent cette image de circuit de proximité tout en produisant à des échelles industrielles. En 2017, la plus grande serre sur toiture avait été construire fin 2015 sur l'usine d'un fabricant d'éco-savons à Chicago. D'une surface de 23 000 m^2, elle est exploitée par Gotham Greens et devrait produire 450 tonnes de légumes par an [4]. Bien loin d'une agriculture paysanne en vente directe, ces formes industrielles inventent-elles une nouvelle filière intra-urbaine au service de la grande distribution ?

Dans les scénarios prospectifs d'évolution des métropoles sont évoqués des scénarios hybrides dans lesquels une mondialisation accrue de l'approvisionnement alimentaire est associée à des formes plus locales d'approvisionnement en circuits courts (Ernwein, 2015). Les filières de proximité participent à la structuration des territoires et traduisent une volonté de systèmes agroalimentaires plus autonomes des marchés mondiaux (Cochet, 2011a).

Selon Broekmeulen (1998), la part des coûts de distribution dans le prix à la consommation est presque deux fois plus élevée pour les fruits et légumes que pour les produits non périssables. Les producteurs en circuits courts cherchent à optimiser leur logistique des produits périssables pour capter, sans intermédiaires, une meilleure valeur ajoutée sur leur production. Tous les projets d'agriculture urbaine, qu'ils soient associatifs ou capitalistes, associent production et distribution, soit sur le même lieu, soit à proximité (Fesquet, 2013). Cependant, la ré-internalisation de cette activité logistique coûteuse peut participer au déséquilibre économique des fermes urbaines. Les coûts et les temps liés à la logistique sont souvent sous-estimés dans les projets agri-urbains qui atteignent rarement une taille suffisante pour couvrir ces coûts fixes de logistique.

1.3 Trouver un modèle économique viable dans un milieu contraint

La combinaison de plusieurs activités peut permettre d'atteindre un équilibre économique pour les fermes urbaines. Celles-ci sont soumises, à des degrés divers, aux risques naturels et économiques qui rendent l'activité agricole difficilement planifiable : risques climatiques, risques sanitaires, risques de marché, risques génétiques, risques technologiques, risques dans la qualité des intrants, etc. (Radulescu *et al.*, 2011). Se rajoutent à ces risques les contraintes foncières, techniques, logistiques et salariales exacerbées en milieu urbain.

La question du modèle économique est d'autant plus importante en ville que le producteur a accès à un marché de l'emploi bien plus dynamique qu'en milieu rural. Lorsque le revenu qu'il tire de sa ferme et de son travail devient inférieur au revenu du capital qu'il pourrait tirer de la vente de son entreprise ou au revenu qu'il pourrait tirer d'un autre emploi urbain, la pérennité de son activité n'est pas assurée (Phlipponeau, 1956). Aujourd'hui, alors même que l'agriculture péri-urbaine est en déclin, l'agriculture urbaine est mise en avant sans réel modèle économique.

Les approches économiques peuvent être très différentes. Les partisans du maraîchage bio-intensif inspiré de Jean-Martin Fortier [5] ou Eliot Coleman disent « développer un chiffre d'affaire de près de 120 000 euros à l'hectare et ainsi vivre correctement d'une activité agricole intra-urbaine ou péri-urbaine ». Pour les promoteurs des systèmes hors-sol hydroponiques, les investissements sont une barrière à l'entrée pour les petits acteurs. On parle d'investissements de 1300 €/m^2 (UrbanFarmers [6], Bâle, Suisse) ou même jusqu'à 1500 €/m^2 (Lufa Farm [7], Montréal, Canada) pour des serres de

4. gothamgreens.com/our-farms/
5. Site de Jean-Martin Fortier : www.lejardiniermaraicher.com
6. Site de Urban Farmers : urbanfarmers.com
7. Site des Fermes Lufa : www.lufa.com

production urbaine, contre 100 €/m^2 à la campagne. La rentabilité de leur modèle de production ne permet pas aujourd'hui de couvrir les amortissements de telles installations.

Un des modèles économiques qui tend à se généraliser repose sur la capacité du producteur à tisser une relation de confiance auprès du consommateur et à s'en servir pour faire aussi (et principalement) de l'achat-revente de produits frais. L'agriculture urbaine peut être pensée comme un maillon d'une nouvelle filière en construction autour des systèmes agricoles durables. La complémentarité indispensable avec les systèmes agricoles péri-urbains, ancrés dans les formes classiques d'économie concurrentielle, sélectionnera à moyen terme les exploitations ayant trouvé un équilibre économique durable peu dépendant des soutiens institutionnels.

2 Modélisation et aide à la décision pour les exploitations et les filières agricoles

Aujourd'hui, la *smart agriculture* est considérée comme la solution à de nombreux problèmes agricoles (Wolfert *et al.*, 2017). A l'aide des drones, des tracteurs et autres objets connectés et d'outils d'aide à la décision puissants, les agriculteurs peuvent adapter leurs opérations aux besoins des cultures. Si un drone détecte des plantes moins développées au milieu d'une parcelle, une dose d'engrais plus forte sera apportée localement pour accompagner le développement de la plante. Les perspectives de développement sont immenses pour une utilisation plus efficiente et moins polluante des engrais et produits phytosanitaires de synthèse.

Cependant, ces outils conçus pour les grandes cultures spécialisées (grandes fermes céréalières), restent difficiles à appliquer et à rentabiliser sur des fermes diversifiées comme les fermes maraîchères que nous étudions. La culture spécialisée sous serre est une exception ; dans ce milieu contrôlé et artificialisé, de nombreux modèles sont développés pour ajuster les paramètres de lumière, température, irrigation et nutrition nécessaires à chaque plante (Ahumada et Villalobos, 2009). Dans nos travaux, nous nous concentrons sur des outils d'aide à la décision qui accompagnent la montée en compétence du producteur diversifié pour mieux gérer son exploitation (McCown, 2002). Nous présentons dans ce chapitre une vision globale du traitement des problématiques qui nous intéressent dans la littérature. Certains aspects seront approfondis dans les chapitres suivants pour analyser les modèles proposés, notamment sur les techniques de modélisation, les problèmes de références en Recherche Opérationnelle ou la complexité des problèmes.

2.1 Le système de production agricole, un modèle du fonctionnement de l'exploitation agricole

L'approche systémique, une représentation de la réalité

L'analyse systémique est un outil intellectuel pour appréhender la complexité des situations réelles agricoles que nous étudions. L'analyse méthodique de l'organisation et du fonctionnement de l'agriculture à différents échelles (figure 1.8) nous donne une vision approchée et compréhensible d'une réalité en constante évolution (Mazoyer et Roudart, 2002). Un système de production est la modélisation d'une exploitation type, représentant un ensemble d'exploitations possédant la même

Concept	Système agraire		
	Système de production (*farming system*) Système d'activités		
	Système de culture / système d'élevage		
Objet / échelle d'analyse	Parcelle / troupeau	Exploitation agricole	Village / région / nation
Type d'analyse	Agro-écologique (bio-technique)	Agro-socio-économique	Agro-géographique et socio économique

FIGURE 1.8 – *Échelles d'analyses des systèmes de production agricoles (Cochet, 2011b)*

gamme de ressources et pratiquant une combinaison similaire et spécifique de systèmes de culture et de systèmes d'élevage (Garambois et Devienne, 2012).

Le système de production est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés pour atteindre un certain niveau de production. Il a une cohérence interne entre les éléments constituant le système. Le système de production fonctionne, évolue, se reproduit, se transforme ou disparaît en fonction de facteurs internes et externes. Modéliser le fonctionnement d'un système de production nécessite de définir un « état » du système, de l'imaginer stable à un moment donné (Cochet, 2011a). Le système agraire est quant à lui un "un mode d'exploitation du milieu, historiquement constitué et durable, adapté aux conditions bioclimatiques d'un espace donné, et répondant aux conditions et aux besoins sociaux du moment" (Mazoyer, 1987 cité par Cochet (2011b)). Le système agraire caractérise de façon dynamique les interactions entre différents systèmes de production avec l'agro-écosystème à l'échelle d'une région agricole cohérente.

Le modèle de système de production reste une représentation finalisée d'une situation réelle. Il ne traduit jamais la réalité dans toute sa complexité, mais est une tentative de compréhension et de reproduction des principaux processus guidant l'évolution d'un objet réel, une exploitation agricole.

Composition et caractéristiques d'un système de production

Nous mobilisons le concept de système de production. Le système de production traduit l'interaction complexe entre des processus naturels et une séquence spatiale et temporelle de techniques humaines pour agir sur ces processus biophysiques (Garcia *et al.*, 2005; Le Gal *et al.*, 2009). Un système de production agricole est la combinaison cohérente de systèmes de culture et d'élevage à l'échelle de l'exploitation agricole. Il mobilise des ressources disponibles sur la ferme (travail, capital, terres, matériels et connaissances) ou fournies par son environnement, afin de produire des biens et services, autoconsommés ou vendus hors de l'exploitation (Le Gal *et al.*, 2011). Le fonctionnement du système de production est très lié à l'environnement naturel, social, politique et économique. Ainsi, un système de production implique plusieurs fermes, plusieurs familles, les populations et communautés proches, les acteurs économiques et politiques (Woodward *et al.*, 2008)

Une des difficultés de la modélisation des systèmes de production réside dans le fait que de nombreuses règles de décision sont inaccessibles de prime abord à l'observateur, car implicites et

subjectives pour le producteur (McCown, 2002). Au-delà des considérations purement techniques, il est nécessaire de faire appel aux sciences sociales pour déterminer les raisons des choix des producteurs et trouver la rationalité qui guide le fonctionnement du système de production (Cochet, 2011a).

Le système de culture est une représentation logique de la succession des cultures et de la séquence des opérations pratiquées par l'agriculteur sur une parcelle ou d'un groupe de parcelles travaillées de façon similaire (Cochet et Devienne, 2006). Le système de culture est lié à la notion d'itinéraire technique, détaillée dans la section 2.3 du chapitre 2. Le système d'élevage est la représentation du fonctionnement du troupeau ou d'un lot d'animaux menés de façon homogène. Il comprend notamment les stratégies de reproduction et d'alimentation. Dans la suite, nous n'aborderons pas l'élevage, très peu présent dans le contexte que nous étudions.

Management et prise de décision

La plupart des exploitations françaises s'inscrivent dans ce que l'on appelle l'agriculture familiale, où cellule domestique et entreprise agricole sont fortement liées. En 2010, 69% des exploitations étaient des exploitations unipersonnelles (Grandjean *et al.*, 2016). Les agriculteurs assurent aussi bien la gestion de l'entreprise que la réalisation des tâches quotidiennes. Le producteur décide souvent seul de la séquence des opérations et de leur mise en œuvre pour atteindre ses objectifs en se fondant sur sa connaissance empirique de l'environnement (Garcia *et al.*, 2005). Cela implique une interconnexion, souvent combinatoirement complexe, des niveaux de décisions, sur différentes échelles spatiales et temporelles (Le Gal *et al.*, 2011; Jang et Klein, 2011).

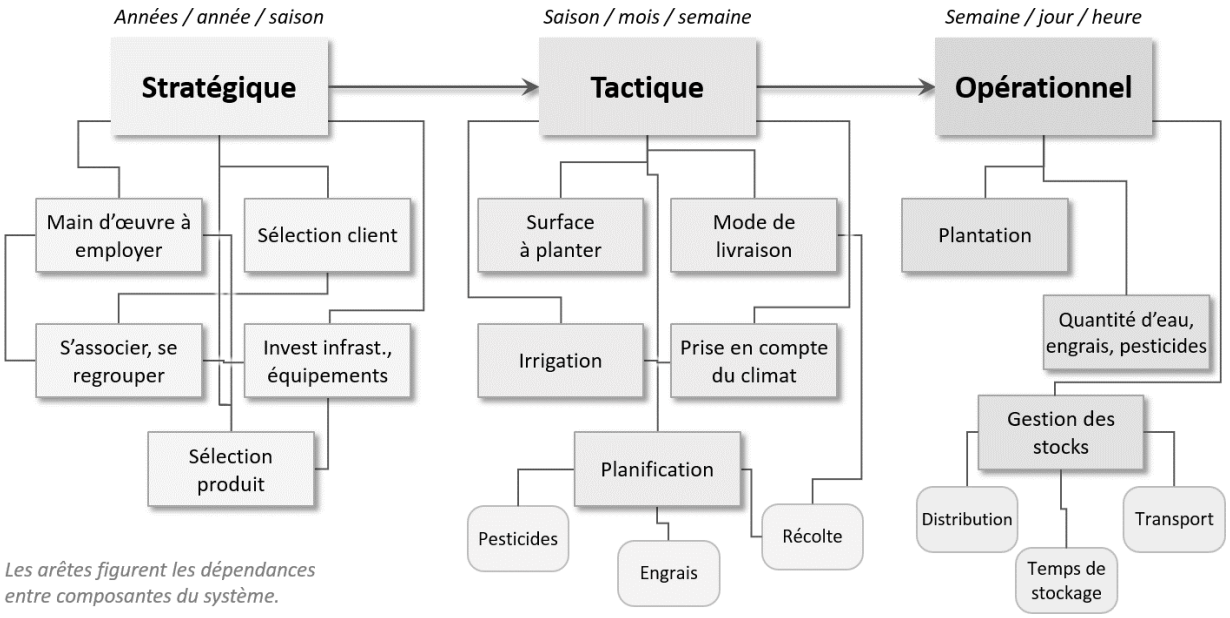


FIGURE 1.9 – *Niveaux de décisions en agriculture, adapté d'après Jang et Klein (2011)*

La distinction entre les échelles stratégique, tactique et opérationnelle n'est pas toujours simple, car dépendante du problème étudié (Shukla et Jharkharia, 2013). Nous préciserons ce que nous entendons par stratégique et tactique les chapitres suivants. Nous choisissons de travailler à l'échelle de la ferme car c'est à cette échelle que les producteurs prennent leurs décisions, allouent leurs différentes ressources, priorisent les activités, décident les investissements. C'est aussi à cette échelle

qu'ils prennent en compte les risques et aléas propres à l'agriculture et qu'ils définissent leur réponse à ces aléas aux différentes échelles spatiales et temporelles (Woodward *et al.*, 2008).

2.2 La conception de systèmes de production agricoles assistée par modèle

La conception assistée par modèle accompagne la diffusion de pratiques innovantes au sein des projets de développement agricole depuis plus de 25 ans.

La question de l'innovation à l'échelle de l'exploitation agricole

Les agriculteurs sont poussés à innover pour faire face à une concurrence internationale et la grande incertitude de leur environnement naturel, social, politique et économique. L'innovation n'est pas nécessairement l'achat d'une machine plus performante, ou une course à l'agrandissement. L'innovation n'est plus pensée comme un objet ou une pratique isolés, mais comme l'intégration d'un outil, d'une variété ou d'une pratique au sein du système de production. Ce n'est pas un phénomène isolé, mais bien une modification du fonctionnement du système qui peut se faire à différents niveaux : stratégique, tactique ou opérationnel (Le Gal *et al.*, 2011). Cette modification de fonctionnement du système peut nécessiter ou provoquer des changements à d'autres niveaux du système agraire, dans les filières amont et aval, au niveau des politiques, etc.

Au sein du système de production, l'innovation est la recherche de moyens techniques, managériaux et sociaux pour améliorer les résultats des systèmes de production (Woodward *et al.*, 2008). Pour ce faire, au delà de la definition d'un paquet technique à diffuser largement aux producteurs, il s'agit d'identifier les bons interlocuteurs et de comprendre comment l'élément innovant peut s'inscrire dans leur système, dans leur objectif comme dans leurs contraintes. Par exemple, une pratique économique en pesticides pourra être économiquement intéressante quand elle est considérée isolément, mais elle ne pourra s'inscrire dans le système d'un producteur car elle nécessitera un surplus de main-d'œuvre à un moment où cette ressource est déjà saturée. *Et, comme toujours en agriculture, ce sont les pointes de travail les plus chargées et les plus contraignantes qui limitent, de fait, le développement des nouveaux systèmes (Mazoyer et Roudart, 2002).* Innover par essais-erreurs est une pratique longue et coûteuse, surtout si elle est menée sur des systèmes réels ou partiels. La modélisation, permettant de travailler sur des systèmes virtuels mais suffisamment fidèles à ceux de la réalité, prend alors tout son sens pour accompagner les producteurs dans la conception, l'évaluation et la mise en œuvre de pratiques innovantes dans leur ferme (Sempore *et al.*, 2015).

Dans l'économie actuelle, la conception de nouveaux moyens de production (machines, engrais, produits phytosanitaires, variétés) est aujourd'hui prise en charge par des firmes multinationales ou des centres de recherche (Mazoyer et Roudart, 2002). Les producteurs doivent souvent adapter leurs pratiques et leur environnement à des innovations standardisées. La conception assistée par modèle, capable de prendre en compte les pratiques sans cesse changeantes des producteurs, peut aider à identifier et construire avec ceux-ci les innovations qui leur seront le plus utile.

Différentes approches de modélisation à l'échelle de la ferme

Si de nombreux outils d'aide à la décision se focalisent sur le niveau opérationnel, celui de la gestion de l'exploitation (Glen, 1987), rares sont ceux qui s'intéressent aux décisions stratégiques (McCown, 2002). Pourtant, Le Gal *et al.* (2009) pointent l'importance de fournir aux producteurs ou à leurs conseillers des outils permettant l'évaluation ex-ante d'innovations sur les systèmes de production.

Au-delà de la réponse à une question, à une problématique précise, les outils d'aide à la décision à l'échelle de la ferme accompagnent la prise de recul et la montée en compétences des producteurs. Construire et utiliser un outil d'aide à la décision amène les producteurs à organiser leur connaissance sur le fonctionnement de leur système de production, à générer de nouvelles idées sur le fonctionnement du système et à prédire le comportement du système en réponse aux interventions proposées (Woodward *et al.*, 2008).

Dans leurs revues de la littérature, Le Gal *et al.* (2011), Sempore *et al.* (2015) et Woodward *et al.* (2008) distinguent plusieurs approches de modélisation selon les objectifs poursuivis.

— Les modèles de simulation mathématique sans optimisation, souvent fondés sur des modèles biophysiques, permettent de tester l'impact d'une stratégie sur les principaux indicateurs de production. Ils sont très flexibles et sont fréquemment utilisés pour évaluer l'intérêt d'une innovation technique ou organisationnelle sur la ferme (Andrieu *et al.*, 2012; Rodriguez *et al.*, 2014). Microsoft Excel est souvent utilisé pour ces modèles, comme dans Martin *et al.* (2011) afin de faciliter l'appropriation par les utilisateurs et ainsi la diffusion des outils développés.
— Les modèles fondés sur des règles de décision (*rule-based models*) exploitent les causalités mises en évidence sur la ferme. Le modèle se construit sur des décisions en « si condition alors action ». Leur simplicité est leur grand avantage. Ils sont faciles à construire et à faire évoluer avec les producteurs qui se les approprient et s'y fient facilement (Andrieu et Nogueira, 2010; Moreau *et al.*, 2013). Ils trouvent leurs limites quand le modèle devient très combinatoire (de nombreuses conditions et actions entremélées).
— Enfin, les modèles d'optimisation sont basés sur des modèles de programmation mathématique optimisant une fonction objectif (le plus souvent la maximisation du profit ou du revenu net) ou la minimisant (des charges, des coûts de production), sous un certain nombre de contraintes (Soto-Silva *et al.*, 2016). La programmation linéaire est l'outil de modélisation le plus communément utilisé pour optimiser les systèmes de production. Il consiste à représenter un système comme une combinaison d'activités sous forme de fonctions et d'équations linéaires. Très utilisés dans l'industrie, les modèles ont eu relativement peu d'effet dans le domaine agricole, du fait de leur complexité de mise en œuvre et de la difficulté que les producteurs peuvent avoir à comprendre leur fonctionnement [8].

Différentes approches de modélisation à l'échelle de la chaîne logistique

La chaîne logistique – *supply chain* en anglais – désigne le processus intégré par lequel plusieurs organisations collaborent en vue d'acquérir des matières premières ou produits semi-finis, de les

8. Dans le cadre du travail de thèse, nous intégrons la question de la compréhension et de l'adoption de nos outils par le public agricoles dans le développement des modèles, ainsi que dans la définition des données d'entrée et des indicateurs de sortie. Une interface homme-machine est conçue spécifiquement dans ce but (voir chapitre 5).

transformer et de distribuer les produits finis à des clients finaux. La chaîne logistique s'étend bien au-delà de la seule problématique du transport (Mula *et al.*, 2010).

Une chaîne logistique se caractérise par les acteurs qui y participent et par les flux entre ces acteurs. Dans un contexte agricole, la chaîne logistique implique les fournisseurs en amont de la production, les producteurs agricoles, les transformateurs éventuels, les structures de stockage et de conditionnement, les transporteurs et les distributeurs. Y participent aussi les structures d'accompagnement, de conseil, de recherche et de financement. Ils sont liés par des flux physiques (produits, matières), des flux financiers, des flux d'information, des flux de process, et des flux d'énergie et de ressources naturelles (Ahumada et Villalobos, 2009; Verdouw *et al.*, 2010; Tsolakis *et al.*, 2014; Belaïd *et al.*, 2017).

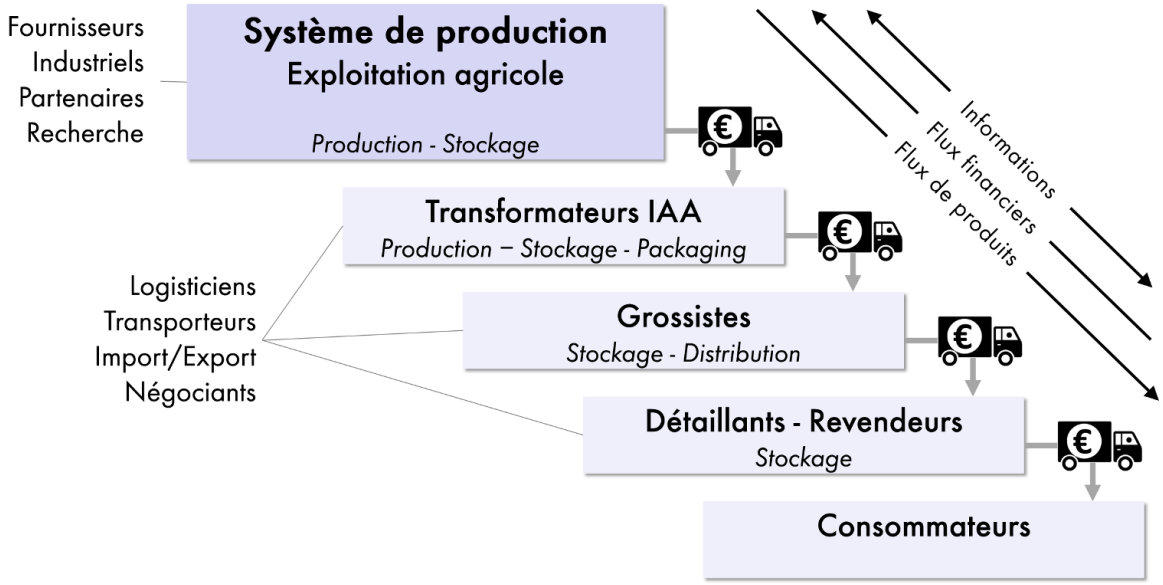


FIGURE 1.10 – *Représentation de la chaîne logistique agro-alimentaire d'après Tsolakis* et al. *(2014)*

La viabilité de l'activité agricole, du fait de la périssabilité des produits, dépend grandement de l'efficacité du transport et de la logistique (Ahumada et Villalobos, 2009). Au-delà des paramètres agronomiques et climatiques, la planification des récoltes est très liée aux caractéristiques de distribution et de transport (Borodin, 2014). La chaîne logistique des fruits et légumes est étudiée sous différentes formes et différents noms. Soto-Silva *et al.* (2016) définissent la *Fruit Supply Chain* comme toutes les activités pour fournir, produire et distribuer des fruits au consommateur final ; production, transport et distribution doivent y être planifiés conjointement pour une efficacité optimale. Le développement des transports frigorifiques à la fin du XIXème siècle a internationalisé la distribution des produits frais – fruits, légumes, produits laitiers et carnés (James *et al.*, 2006). Cette performance du transport et l'industrialisation des processus agricoles rapprochent les *agri-food supply chains* des chaînes logistiques industrielles (Ahumada et Villalobos, 2009). Ainsi, on observe une spécialisation et une intégration verticale de certaines exploitations au sein des *Fruit Supply Chains* pour gagner en compétitivité et en réactivité (Soto-Silva *et al.*, 2016).

Pourtant, la logistique des produits frais se différencie par l'importance donnée à la qualité, à la sécurité alimentaire et à la variabilité générée par les aléas climatiques sur la quantité et la qualité de produits récoltés ainsi que sur les dates de récoltes (Ahumada et Villalobos, 2009). Quatre spécificités majeures, que nous détaillons ci-dessous, participent à rendre les chaînes logistiques agricoles plus complexes que les autres chaînes logistiques.

Des délais longs entre décision de produire et disponibilité des produits. Les cycles de production agricole sont longs, de quelques semaines à plusieurs mois. En production fruitière, il faut attendre plusieurs années entre la plantation d'un verger et la récolte des premiers fruits. Selon les latitudes et les méthodes de productions, le démarrage des cultures ne peut se faire que dans une fenêtre calendaire donnée. Le producteur agricole est un spéculateur : il investit dans la mise en place d'une production sans connaître la demande et les prix de vente qu'il pourra atteindre (Soto-Silva *et al.*, 2016). Ainsi, l'élasticité de l'offre par rapport aux prix est faible à court terme, mais peut être brutale et exagérée sur le long terme, entraînant des fluctuations cycliques des volumes disponibles et des prix de marché (Mazoyer et Roudart, 2002). S'ajoute à ces temps longs, une incertitude sur les volumes de production à chaque saison en raison des aléas climatiques ou sanitaires.

Les produits agricoles sont périssables, notamment les fruits et légumes que nous étudions. Des caractères essentiels de la qualité, tels que la couleur, la fermeté ou le croquant, dépendent de la possibilité de récolter les produits à maturité et décroissent rapidement avec la durée de stockage (Ahumada et Villalobos, 2009; Soto-Silva *et al.*, 2016). Le client est très sensible à la qualité visible du produit frais.

La production agricole est majoritairement assurée par de petites entreprises, si bien que **l'offre en produits frais est disséminée parmi de multiples producteurs** (Lucas et Chhajed, 2004). Concentrer, agréger cette offre est aussi indispensable que complexe pour mettre en place une chaîne logistique efficiente.

Si la demande en produits alimentaires de base (céréales, tubercules) est assez peu élastique par rapport aux variations de prix (Mazoyer et Roudart, 2002), elle peut fortement varier pour les fruits et légumes frais (substitution d'un produit par un autre notamment). **La demande en produits frais est très incertaine, autant en volumes qu'en prix** (Lowe et Preckel, 2004) et les marges économiques sont relativement faibles (Soto-Silva *et al.*, 2016).

Les approches de modélisation

Depuis une dizaine d'années, l'industrie agro-alimentaire identifie la gestion de la chaîne logistique comme une pierre angulaire de sa compétitivité (Soto-Silva *et al.*, 2016). La gestion de la chaîne logistique, en tenant compte de la volatilité de l'offre, de la demande et des prix, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Des modèles flexibles sont indispensables pour accompagner les acteurs de terrain dans la prise de décision dans toute la diversité des projets agricoles. Tsolakis *et al.* (2014) cartographient les recherches concernant la conception et la gestion des *agri-food supply chains* selon les processus d'aide à la décision. Ogier *et al.* (2013) développent une approche de la chaîne logistique numérique pour aider des réseaux de petites et moyennes entreprises agricoles et agroalimentaires à repenser collectivement l'organisation de la logistique de leurs produits locaux. Ils s'intéressent notamment à la conception du réseau logistique de produits frais en circuits courts, à l'allotissement des produits commandés par la restauration collective, ainsi qu'à la planification tactique des activités de production, de stockage et de transport au niveau de la chaîne logistique, mettant en évidence la complexité algorithmique due à l'aspect combinatoire des problèmes traités.

La **conception de la chaîne logistique** occupe une place importante dans les travaux de recherche. Pour Farahani *et al.* (2014), elle vise à définir un réseau efficient pour une nouvelle chaîne logistique ou à repenser un réseau existant pour accroître sa valeur. L'auteur constate que la plupart des modèles supportant la conception de chaînes logistiques n'intègrent pas l'environnement concurrentiel et n'ont de valeur qu'après définition de scénarios de demandes basés sur des études de marché.

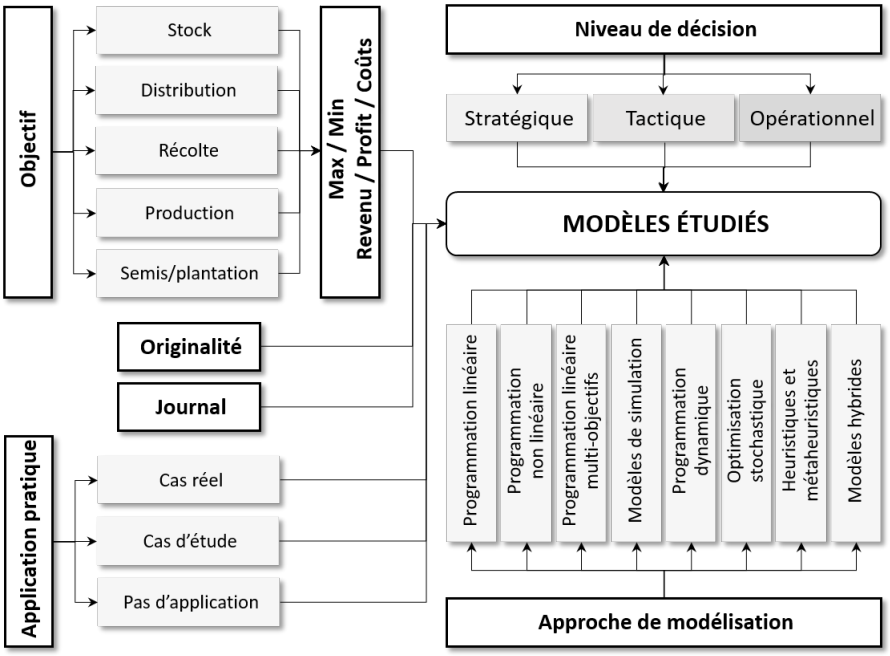


FIGURE 1.11 – *La diversité des modèles de Recherche Opérationnelle appliqués à la chaîne logistique des fruits frais, selon Soto-Silva* et al. *(2016)*

Pour les chaînes logistiques existantes, la **gestion de la chaîne logistique** aide, par différentes approches, à optimiser la coopération entre les différents acteurs du réseau afin de produire et distribuer la bonne quantité de biens au bon endroit et au bon moment, le plus efficacement possible (Shukla et Jharkharia, 2013). Cette gestion inclut des processus relevant de différents niveaux de décisions : planification de la production, gestion des stocks et distribution physique des produits. La revue réalisée par Ahumada et Villalobos (2009) montre tout l'intérêt d'intégrer aux décisions de l'aval les décisions agricoles comme la planification des cultures ou des récoltes, le choix des cultures ou la gestion de la main d'œuvre.

Cependant, plusieurs auteurs pointent les limites des approches de modélisation actuelles. Pour Soto-Silva *et al.* (2016), les approches holistiques manquent tant dans la conception que dans la gestion de la chaîne logistique, pour que les outils soient pleinement utiles dans filières de produits périssables. Les modèles ne parviennent pas à capter l'impact des dynamiques et des incertitudes de production et de marché sur les relations entres acteurs de la chaîne logistique (Clemente *et al.*, 2015). Une difficulté supplémentaire pour les filières agroalimentaire est la prise en compte d'objectifs économiques et non-économiques parfois concurrents : rentabilité à court terme de l'exploitation agricole, transmissibilité de l'exploitation aux enfants, politiques environnementales, etc. (Lucas et Chhajed, 2004). Bien que complexes à mettre en place et à résoudre, des modèles plus globaux, plus intégrés pourraient permettre des économies substantielles dans toute la chaîne de valeur (Ahumada et Villalobos, 2009). Mais comment concilier la complexité et l'exhaustivité des modèles intégrés avec l'enjeu de développer un outil utile et compréhensible pour les acteurs de terrain ?

Les modèles sont-ils utilisés ? ou la modélisation face aux acteurs de terrain

Les outils et modèles évoqués plus haut sont conçus pour accompagner un changement de pratique ou pour évaluer l'impact d'une innovation à l'échelle de la ferme ou de la chaîne logistique. Les acteurs économiques ne pourraient tester tous les choix possibles par essais-erreurs de systèmes

réels, ou partiels, pratique chronophage et coûteuse (Le Gal *et al.*, 2011) et la modélisation peut jouer là un rôle de premier ordre.

Cependant, McCown (2002) montre que les outils d'aide à la décision développés par la recherche, notamment les outils stratégiques, sont assez peu utilisés par les agriculteurs et par leurs conseillers. Contrairement à des organisations à plusieurs niveaux où des responsables peuvent imposer l'utilisation d'outils pour standardiser des processus, le producteur agricole décide de son propre chef s'il souhaite ou non utiliser l'outil d'aide à la décision, et si cet outil va avoir une plus-value au regard de son expérience de terrain et des conseillers qui l'accompagnent. McCown identifie trois grandes questions qu'un producteur peut se poser lorsqu'on lui présente un outil d'aide à la décision :

— Le modèle tel qu'il est conçu traduit-il suffisamment fidèlement le fonctionnement du système de production pour apporter une réelle contribution dans l'évaluation des conséquences d'un projet ?
— Les hypothèses concernant les propriétés du système et les conditions initiales sont-elles suffisamment pertinentes pour que le modèle soit utile ?
— Pour limiter les risques d'hypothèses fausses, est-il possible, techniquement et économiquement, de fournir des informations locales pour montrer que le système virtuel modélisé représente les propriétés et les conditions initiales du système de production réel ?

Caixeta-Filho *et al.* (2002) insistent sur l'importance de l'implication des futurs utilisateurs dès le début de l'élaboration de l'outil d'aide à la décision. Pour leurs travaux avec une grande entreprise de production de tulipes au Brésil, ils ont donné des cours théoriques et des exemples d'utilisation de la Recherche Opérationnelle pour montrer aux responsables de production que la démarche pouvait avoir un sens. Impliquer dès le début les *clients* du logiciel permet de prendre en compte et de prioriser des objectifs non évidents et non chiffrés en lien avec les technologies utilisées, l'élément humain, les risques, les dynamiques d'entreprise et la vision du temps (Garcia *et al.*, 2005; Martin et Magne, 2015). Dans un tout autre contexte, l'univers hospitalier, Weil (1990) met en évidence l'importance, voire la primauté, des aspects sociologiques dans certains projets : des blocages hiérarchiques, relationnels ou des arrangements entre collègues primaient sur les aspects techniques et réglementaires pour l'établissement automatisé des calendriers de gardes des infirmières de l'hôpital. Si le producteur agricole décide seul sur son exploitation, ses décisions n'en sont pas moins influencées par son environnement social et économique que par ses contraintes techniques. Il est primordial d'établir un langage et un espace de réflexion communs au chercheur et au producteur, pour ancrer les modèles dans la spécificité des situations réelles (Woodward *et al.*, 2008).

Enfin, bien que rêvés par leurs concepteurs comme des assistants du quotidien pour les producteurs, les outils d'aide à la décision cessent souvent d'être utilisés lorsque le processus de décision est acquis, assimilé par le producteur et qu'il devient une routine. C'est dans la phase d'un projet, à l'aube d'un changement que ces outils sont les plus utiles. *"Why don't farmers use DSSs [decision support systems] more ? Answer : You need a doctor when you're sick but not when you're well."* (McCown, 2002). Comme en médecine, une approche préventive dans l'aide à la décision peut être complémentaire d'une approche réactive.

3 Conclusion sur l'état de l'art

Cet état de l'art sur le contexte agricole et le traitement de ses problématiques par la recherche à l'aide de modèles nous permet de tirer plusieurs axes de travail. Les modèles et les outils d'aide à la décision sont des moyens économiquement intéressants pour évaluer l'impact d'un changement, d'une innovation dans une ferme ou dans une chaîne logistique agro-alimentaire. Moins coûteux et moins chronophages qu'une recherche par tâtonnement et par essais-erreurs de systèmes réels, ou partiels, ils permettent de considérer différents niveaux de décision et différentes échelles, de la parcelle à la filière globale. De nombreux auteurs regrettent l'absence d'approche globale qui pourraient traduire l'interdépendance des acteurs d'une filière soumis à de forts aléas d'offre, de demande et de prix. L'approche intégrant production-distribution, notamment mise en avant par Ahumada et Villalobos (2009), comble en partie ce manque en liant des décisions de production, notamment la planification de la récolte, avec des actions de l'aval de la filière, comme la gestion du stockage et de la distribution en réponse à des demandes de clients. Cependant, les modèles globaux sont complexes à mettre en place et à valider. Cette complexité explique la rareté des cas d'utilisation dans des situations réelles. La compréhension des vrais besoins des producteurs et de leurs conseillers est fondamentale et l'implication de ces acteurs est souhaitée.

Nous avons tenu à réaliser ce travail de recherche au plus proche du terrain, grâce au dispositif CIFRE de l'ANRT [9]. Au sein des *Fermes de Gally*, j'ai pu échanger avec des chefs d'entreprises agricoles, des porteurs de projets agricoles, des conseillers, des entreprises agro-alimentaires, des distributeurs. Au cours de la thèse, nous avons eu la chance de collaborer avec des acteurs du développement agricole, notamment des conseillers de la Chambre d'agriculture de l'Isère et des chercheurs du CIRAD [10]. La confrontation régulière avec les situations de travail de ces acteurs nous a permis d'identifier les indicateurs pertinents et les règles de décision des acteurs de la chaîne de valeur. Nous espérons que cette expérience au plus proche des attentes des acteurs nous aidera à proposer un outil pertinent et utile.

Nous présentons dans la suite l'outil d'aide à la décision que nous proposons pour le problème de conception de systèmes de production adaptés aux besoins des fermes urbaines. Trois sous-problèmes seront présentés avec leur modèles associés. Le fonctionnement global de l'outil sera ensuite illustré par des cas concrets.

9. Conventions Industrielles de Formation par la REcherche, dispotif de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

10. Centre de coopération internationale en recherche agronomique

2 Un modèle de planification tactique des fermes maraîchères

Résumé du chapitre

Nous présentons dans ce chapitre un modèle de planification tactique des investissements, de la main d'œuvre et de la production d'une ferme maraîchère diversifiée. En raison du caractère périssable des fruits et légumes, nous prenons en compte l'impact des décisions de planification tactiques sur les décisions stratégiques, notamment en ce qui concerne le dimensionnement d'une main d'œuvre coûteuse. Nous proposons une formulation spécifique des itinéraires techniques pour concilier ces deux niveaux de décisions sur des cas multi-produits et multi-techniques, avec un horizon de planification d'un an.

Nous exposons le modèle développé en programmation linéaire mixte, ainsi que des résultats numériques et graphiques sur le cas concret d'une ferme urbaine exploitée par les Fermes de Gally. Nous obtenons des résultats cohérents avec la réalité, résultats qui montrent l'intérêt de la combinaison de décisions stratégiques et tactiques pour dimensionner des systèmes de production de produits périssables.

Ce travail a fait l'objet d'un article soumis à *International Journal in Production Research*, en cours de révision (Brulard *et al.*, 2017b), ainsi que de trois communications scientifiques Brulard *et al.* (2015a,b, 2016b).

Contexte

Alexis, jeune maraîcher passionné par l'agriculture hors-sol, a l'opportunité d'exploiter une friche urbaine en région parisienne. L'étude de marché qu'il a réalisée lui confirme qu'il y a un vrai marché pour des produits ultra-frais, notamment les fruits " gourmands " qu'on picore négligemment et qu'on a fini de manger avant d'arriver à la maison. Il sait qu'il n'a pas les moyens d'installer une serre pour produire toute l'année, et les contraintes d'urbanisme de la zone ne l'y autorisent pas. Il se tourne donc vers une production saisonnée, avec des produits à forte valeur ajoutée, comme la fraise, la framboise, la tomate-cerise, les mini-poivrons, etc. Alexis se pose la question des surfaces à cultiver pour chaque production, des variétés à sélectionner, de la main d'œuvre à employer pour obtenir la meilleure marge, en tenant compte des prix de vente et du caractère périssable des produits.
Benjamin, ami de longue date d'Alexis, s'intéresse peu au hors-sol. Il préfère l'agriculture en pleine terre, avec des techniques de production en agriculture biologique. Il s'installe sur une petite ferme péri-urbaine de 3 hectares, anciennement cultivée en salade et radis conventionnels. La première année, il a peu de moyens et n'a pas encore constitué ses réseaux de commercialisation. Il décide donc de débuter une production saisonnée, avec un assolement simple, en limitant la main d'œuvre à sa seule capacité de travail. Il se pose la question des cultures qu'il peut mettre en place avec ces fortes contraintes de main d'œuvre et de trésorerie.

Le modèle que nous présentons dans cette partie permet d'aider Alexis et Benjamin à prendre leurs décisions, sur un horizon annuel, sans prendre en compte les rotations de culture. Nous recherchons le meilleur dimensionnement stratégique de la ferme, i.e. la taille des parcelles, les infrastructures, les équipements et la main d'œuvre nécessaires, pour répondre à une demande donnée. Le fait de travailler sur une exploitation diversifiée cultivant de nombreux produits périssables nous pousse à prendre en compte la combinaison tactique des itinéraires techniques pour lisser les pics de production et de travail. Nous présentons dans ce chapitre un modèle intégré de dimensionnement stratégique et de planification tactique de fermes maraîchères urbaines professionnelles ciblant une demande en produits locaux de qualité. Notre objectif est la viabilité technico-économique des exploitations agricoles. Nous développons un modèle multi-techniques, multi-produits et multi-clients pour adresser la diversité des cas de fermes urbaines.

Le chapitre sera organisé comme suit. Une première partie est consacrée à l'analyse de la littérature existant autour de ce problème. Nous présentons ensuite, dans la partie 1, un modèle en programmation linéaire mixte pour traiter ce problème. Le problème peut être vu comme un problème de sac-à-dos (*knapsack problem* en anglais) multidimensionnel, multichoix et multipériode, consistant à sélectionner le meilleur ensemble d'itinéraires techniques et de profils de main d'œuvre. Le problème de sac-à-dos est combiné à un problème de dimensionnement de lot (*lot-sizing* en anglais) pour prendre en compte la production et le stockage de produits périssables sur un horizon de planification d'un an. Nous étudierons la complexité de ce problème en partie 4. Des résultats numériques et graphiques sur des cas réels et fictifs seront présentés et analysés en partie 5.

	Modèle de planification tactique	Modèle de dimensionnement stratégique	Modèle de sélection des clients
PARAMETRES DU MODELE			
Horizon temporel	1 an	2 à *n* ans	1 an
Pas de temps	1 jour à 1 semaine	1 semaine à 2 mois	1 jour à 1 semaine
Achat-revente auprès d'autres fermes	*Non considéré*	*Non considéré*	Défini par le modèle
Gestion de la périssabilité	Flux à 2 niveaux : stock au champ et en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide
Caractéristique de la demande	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Structure de demande spécifique à chaque client
DECISIONS A PRENDRE			
Sélection des produits cultivés	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Donnée d'entrée
Sélection des méthodes de production	Définie par le modèle	Définie par le modèle	*Non considérée*
Surface des parcelles	Définie par le modèle	Donnée d'entrée	*Non considérée*
Succession de cultures	*Non considérée*	Définie par le modèle	*Non considérée*
Sélection des profils de main d'œuvre	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Main d'œuvre fixe, intérim possible
Sélection des clients	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Obligation de répondre à l'intégralité de la commande des clients sélectionnés.

FIGURE 2.1 – *Positionnement du problème traité dans ce chapitre*

1 Description du problème de planification

Nous étudions la situation d'un producteur qui souhaite démarrer un projet de ferme urbaine sur un terrain d'une surface totale donnée A_{tot}. Il peut cibler différents clients $c \in C$ dont les demandes en produits p sont connues pour chaque période t de l'année, tant en volumes demandés $\Delta_{c,p,t}$ qu'en prix de vente $\Pi_{c,p,t}$. Le producteur peut choisir différents itinéraires techniques k pour obtenir chaque produit, chaque itinéraire technique nécessitant des infrastructures et équipements spécifiques. Différents profils de main d'œuvre (permanents, saisonniers, intérimaires) sont également donnés pour prendre en compte les types de contrats classiques en agriculture.

Notre modèle vise à définir quels produits p cultiver, selon quels itinéraires techniques les cultiver, sur quelle surface a_k^q et avec l'aide de quelle main d'œuvre. Des décisions tactiques entrent en jeu pour tenir compte de la périssabilité des produits. Ainsi, le producteur peut décaler les dates de début des itinéraires techniques dans une certaine fenêtre calendaire. Il peut aussi différer de quelques jours la récolte des produits au champ et conserver les produits après récolte en chambre froide plusieurs jours. Le stockage sur pied et en chambre froide entraîne une dégradation progressive des produits et une réduction de leur prix de vente selon le temps de stockage. Nous présentons notre modèle multi-techniques, multi-périodes et multi-produits dans les sections suivantes.

2 Un état de l'art des approches de modélisation

Nous présentons dans cette section un état de l'art sur les approches de modélisation pour la combinaison de différentes activités et produits au sein d'un système de production et pour la

conception de systèmes de production, avec un focus sur la modélisation des itinéraires techniques et de la main d'œuvre.

2.1 Combiner plusieurs activités et plusieurs produits au sein du système de production

Nous fondons notre modèle sur des cas d'exploitations diversifiées, combinant différentes productions et différentes activités. La diversification des productions agricoles est une pratique de gestion du risque. Ainsi, Radulescu *et al.* (2011) proposent un modèle de planification des cultures en programmation linéaire mixte (MILP), avec objectifs multiples, inspiré de la théorie des portefeuilles financiers, pour maximiser le revenu de la ferme, minimiser le risque environnemental et minimiser le risque financier. La diversification des cultures est un fondement de l'agriculture biologique et permet d'augmenter les rendements et la durabilité du système de production. Elle accroît la capacité d'adaptation du système, notamment face aux variations climatiques (Martin et Magne, 2015). Dos Santos *et al.* (2011) imposent une diversité minimale de cultures dans leur modèle de rotation de cultures en programmation linéaire en Nombres Entiers, en interdisant de planter des plantes de même famille dans des champs adjacents ou de les faire se succéder dans le même champ. Dans leurs travaux, Gonzalez-Araya *et al.* (2015) montrent l'intérêt de combiner différentes variétés de pommiers sur une exploitation pour établir un plan de récolte qui limite les pertes, garantit la meilleure qualité et optimise l'emploi d'une main d'œuvre rare. Leur modèle en programmation linéaire mixte aide le chef de culture à anticiper ses embauches et ses besoins en différents matériels de récolte.

La stratégie de diversification est fortement liée aux choix des débouchés commerciaux. En vente directe, les producteurs maraîchers sont souvent diversifiés pour attirer leurs clients par une gamme large. Diversifier la production peut aussi permettre de valoriser à bon prix des lots de produits en mêlant produits à forte valeur ajoutée et produits à faible valeur ajoutée.

Radulescu *et al.* (2011) reprennent l'analyse de la diversification proposée par Ellis (1998, 2000) selon laquelle les producteurs pratiquent trois types de diversification.

— **Une diversification de produits :** comme dans la gestion de portefeuille boursier, cette diversification vise à réduire la variance des revenus des ventes en participant à plusieurs marchés, en ciblant des marchés peu corrélés ou corrélés négativement.
— **Une diversification spatiale des cultures :** elle consiste à répartir la production dans plusieurs parcelles éloignées (quand cela est possible) pour bénéficier de conditions agro-pédo-climatiques différentes et réduire la variance en rendements. Cette diversification se rencontre notamment chez les producteurs spécialisés cultivant un faible nombre d'espèces.
— **Une diversification variétale :** pour une même espèce, plusieurs variétés sont cultivées, avec des dates de récolte étalées. Cette différenciation est d'une part une différenciation temporelle, permettant de lisser les pics de production et de réduire la variabilité du rendement moyen. D'autre part, en segmentant la production sur différents marchés via les différentes variétés, elle revient à une différenciation de produits.

Au-delà de ces diversifications liées à la production agricole, les producteurs peuvent diversifier leurs activités avec des activités non directement agricoles. Selon Agreste (2012), 26% des producteurs qui commercialisent en circuits courts ont une activité de diversification complémentaire, contre 8% pour les autres producteurs. Ces activités peuvent être très variées : transformation des

produits, accueil à la ferme, pédagogie, etc. Ceriani-baillif *et al.* (2016) s'intéressent au cas des ménages pluriactifs (au moins un des conjoints travaille en dehors de l'exploitation) et des producteurs double-actifs (le chef d'exploitation a un emploi rémunéré en dehors de la ferme). Ils définissent différents types de pluriactivités et leur impact sur la conduite de l'exploitation : pluriactivité de nécessité, pluriactivité patrimoniale, pluriactivité de confort, pluriactivité de développement de l'exploitation, pluriactivité de loisirs et pluriactivité de sortie.

Dans nos travaux, nous prenons en compte la diversification des productions et des activités, car elle détermine le fonctionnement et la prise de décision dans l'exploitation. La combinaison d'activités permet d'accroître la productivité globale du travail en répartissant le travail tout au long de l'année (Cochet, 2011a). Nous cherchons la combinaison d'activités qui utilise au mieux les ressources disponibles et maximise l'objectif ou l'utilité visés par le producteur, comme dans le modèle proposé par Willis et Hanlon (1976). Le caractère périssable des fruits et légumes sur lesquels nous travaillons impose des contraintes spécifiques pour combiner les activités.

2.2 La conception de systèmes de production avec produits et stocks périssables

Travailler avec des produits périssables impacte globalement le système de production et l'organisation de la chaîne logistique, comme le montrent Bakker *et al.* (2012) dans leur revue de la littérature. Le modèle proposé par He *et al.* (2009) pour la conception d'un système de production-stockage optimisé pour vendre un produit à plusieurs marchés illustre la complexité apportée par le caractère périssable de ce produit. Dans sa revue de la littérature, Nahmias (1982) différencie les produits périssables selon que leur durée de vie est fixe (date limite de consommation par exemple) ou aléatoire, sous différentes demandes et différentes politiques de gestion des stocks. Pour Goyal et Giri (2001), on peut distinguer trois types de biens stockés, selon qu'ils sont sujets à l'obsolescence, à la déterioration ou à aucune des deux. Dans de nombreux cas, les travaux de recherche étudient des stratégies de production sur commande (*make-to-order*[1]), qui ne sont pas toujours adaptées aux temps longs de production en agriculture.

Les produits agricoles, comme les fruits et les légumes, commencent à se détériorer dès qu'ils atteignent leur maturité et les stocks peuvent rapidement se perdre. Amorim *et al.* (2012) explorent différents comportements des produits périssables (durée de vie fixe ou libre) pour en évaluer l'impact sur la planification de la production et de la distribution de ces produits. Le modèle présenté par Gonzalez-Araya *et al.* (2015) montre bien que la maturité du fruit, facteur prépondérant de qualité, doit être prise en compte dans la planification de la récolte et des ressources pour la réaliser. La durée de vie des produits dépend de leur susceptibilité à perdre de l'eau et à ramollir, ainsi qu'à leur sensibilité aux chocs et aux attaques de pathogènes (Guerreiro *et al.*, 2015). Le producteur peut mettre en place différentes stratégies pour maintenir la qualité des produits[2].

1. Dans le cas d'une production à la commande, le producteur attend la commande ferme des clients pour démarrer l'approvisionnement en matières premières et la production. Une stratégie inverse consiste à produire pour stocker (*make-to-stock*) lorsque le temps de production est supérieur au délai acceptable par le client.

2. Dans ce travail, nous ne prenons pas en compte les produits cueillis avant maturité pour finir leur murissement au cours de trajets longue distance et de stockages longs, comme c'est souvent le cas pour les tomates ou les bananes. Par exemple, Ahumada et Villalobos (2011b) modélisent le murissement post-récolte des tomates vendues aux grossistes. Nous ne considérons pas non plus les produits conditionnés sous atmosphère contrôlée. Nous nous concentrons sur les produits frais cueillis à maturité pour viser des marchés locaux de qualité.

Dans le problème que nous étudions, les produits peuvent être stockés de deux façons. Au champ tout d'abord, les produits peuvent être stockés sur pied, en différant la récolte de quelques jours après la date de récolte optimale. Certains produits peuvent être stockés au champ / sur pied pendant plusieurs jours (cas des petits fruits, fraises, framboises) jusqu'à plusieurs semaines (cas des carottes et des pommes de terre conservées dans le sol). En chambre froide ensuite, les produits peuvent être stockés sur des durées plus longues avant livraison au client final. Pendant le stockage, les produits périssables subissent des pertes. Nous définissons deux indices temporels pour prendre en compte la périssabilité. $\theta = \{0, \Theta_k - 1\}$ est le nombre de périodes entre le moment où le produit atteint sa maturité pour l'itinéraire technique k et le moment où il est récolté. $\beta = \{0, B_p - 1\}$ est le nombre de jours passés en chambre froide après récolte pour le produit p. Des variables sont définies avec les indices temporels θ et β, comme dans Costa *et al.* (2011). Dans notre modèle, nous définissons un *délai maximal avant récolte* Θ_k. Le producteur peut cueillir dans la période $\{t, t + \Theta_k - 1\}$ un produit atteignant sa maturité en période t. Pour une période t de l'horizon de planification, des stocks sur pied de produits de différents âges θ sont présents sur la parcelle. Le délai maximal Θ_k est défini par rapport à l'itinéraire technique et non par rapport au produit pour deux raisons : 1) le lien entre itinéraires techniques et produits est réalisé grâce au paramètre $\Phi_{p,k}$ pour alléger le modèle et 2) la fonction de perte peut varier pour un même produit en fonction des conditions de cultures (culture au sol ou hors-sol, biologique ou conventionnelle). Ce stockage sur pied entraîne des pertes, puisque les produits continuent de mûrir et commencent à se détériorer (figure 2.2). Dans un premier temps, même si la qualité commence à se dégrader, il n'y a pas de signe extérieur de dégradation. Puis, les changements deviennent visibles jusqu'à ce que le produit pourrisse. Le délai maximal avant récolte et livraison prend en compte la durée minimale pendant laquelle le client veut conserver le produit chez lui avant de le consommer, et les risques de diffusion de ravageurs et pathogènes au champ si des produits abîmés sont laissés.

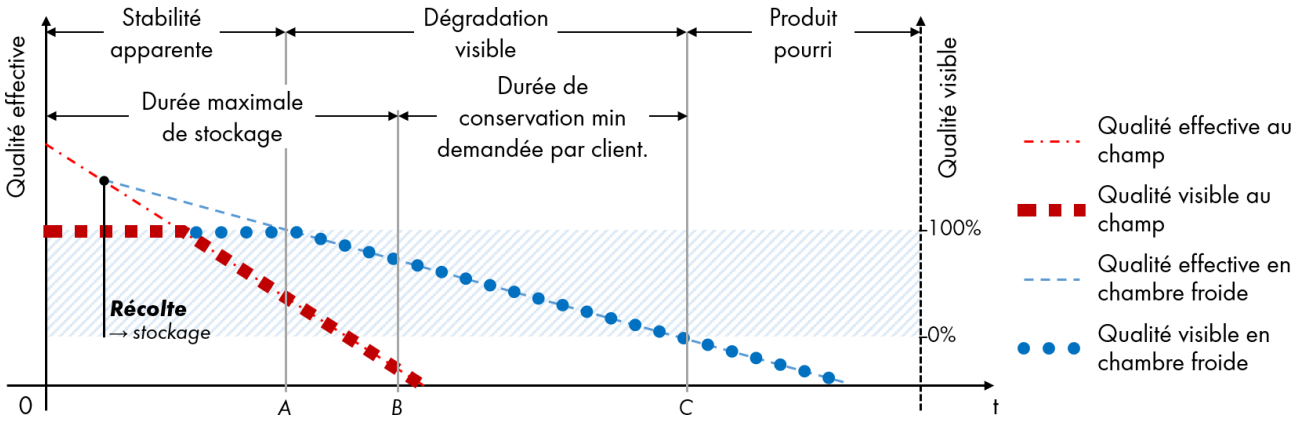


FIGURE 2.2 – *Perte de qualité réelle et apparente au cours du temps, au champ et en chambre froide, d'après Osvald et Zadnik (2008), Ahumada et Villalobos (2011a) et Lütke Entrup* et al. *(2005)*

Nous définissons une *fonction de perte au champ.* Les produits se dégradent quand ils sont cueillis après leur maturité. La quantité de produits commercialisables est diminuée d'une proportion $L_{k,\theta}$, dépendant du délai avant récolte θ. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature technique et scientifique de fonctions de perte pour tous les produits et tous les itinéraires techniques étudiés. Comme illustré dans la figure 2.2, nous supposons une dégradation linéaire de la qualité effective, jusqu'à atteindre 0 à Θ_k (Lütke Entrup *et al.*, 2005). Les données sont construites de telle sorte que la quantité de produits restant commercialisable après Θ_k périodes de stockage au champ est nulle.

Nombre de maraîchers disposent d'une chambre froide ou d'une armoire frigorifique pour prolonger la durée de vie des produits. Des conditions spécifiques de température et d'hygrométrie peuvent ralentir l'activité métabolique des produits frais ainsi que le développement de pathogènes (Paull, 1999; Rizzo et Muratore, 2009). Dans notre modèle, nous ne considérons pas différentes zones de stockage en fonction du couple température-hygrométrie adapté aux différentes catégories de produits. Comme pour le stock sur pied, nous définissons une *durée de vie maximale en chambre froide* B_p et une *fonction de perte en chambre froide*. Les produits se dégradent dans une proportion $\Lambda_{p,\beta}$ en fonction du temps β passé en chambre froide. Ce type de modélisation de la dégradation se rencontre souvent dans la littérature, comme dans les modèles d'Osvald et Zadnik (2008), de van der Vorst *et al.* (2009) ou d'Ahumada et Villalobos (2011a). La figure 2.3 présente les fonctions de perte en chambre froide telles que définies pour le cas d'étude présenté en fin de chapitre d'après les travaux de Boyhan *et al.* (2009); Paull (1999); Aprifel (2014); Lütke Entrup *et al.* (2005); Coelho et Laporte (2014) et des observations personnelles.

Différentes stratégies de prix peuvent être mises en œuvre pour prendre en compte la sensibilité du consommateur à la fraîcheur des produits (Goyal et Giri, 2001; Herbon, 2014; Chang *et al.*, 2016). Pour ce faire, nous introduisons une *réduction du prix de vente selon la durée de stockage* $\widetilde{\pi}_{c,p,\theta,\beta}$. Le prix de vente d'un lot de produit est atténué selon sa durée de stockage sur pied θ et sa durée de stockage en chambre froide β (figure 2.3). Nous n'imposons pas de politique de gestion des stocks. Le modèle définit les lots de produits les plus rentables à récolter, stocker et livrer, en fonction du prix $\Pi_{c,p,t}$ du produit p à une période t et de la réduction de ce prix selon l'âge des produits $\widetilde{\pi}_{c,p,\theta,\beta}$. Des lots de produits de différents âges peuvent être groupés pour répondre à une même demande du client. Il est possible de définir un âge maximal des produits livrés pour chaque client en fonction de ses préférences. En outre, nous ne prenons pas en compte de durée de vie plus courte en chambre froide en fonction de l'âge θ des produits à la récolte. Nous choisissons de raisonner sur les quantités disponibles avec la fonction de perte, et de pénaliser les stockages longs avec la fonction de réduction du prix de vente des produits qui dépend des deux âges θ et β.

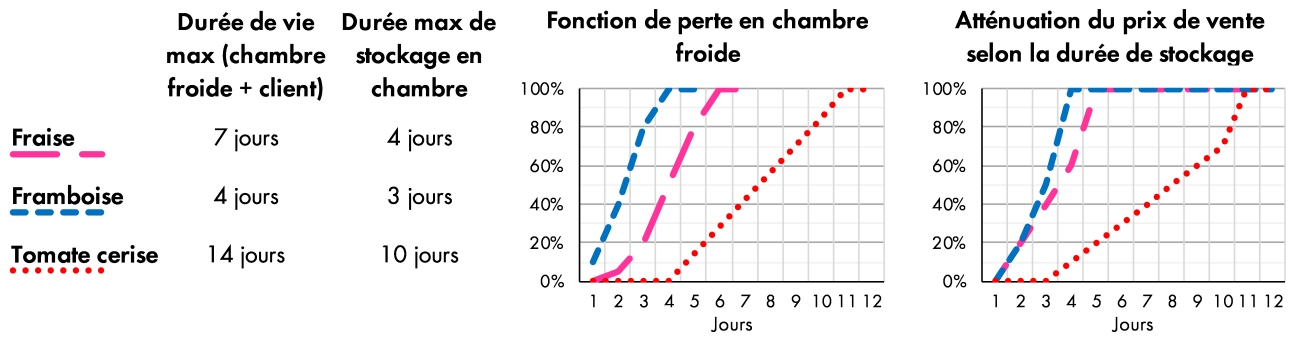


FIGURE 2.3 – *Fonction de perte en chambre froide et réduction du prix en fonction de la durée de stockage, pour les produits étudiés dans le cas concret plus bas*

Les produits périssables doivent être récoltés, qu'ils soient commercialisables ou perdus, pour éviter la prolifération de maladies et de ravageurs. Tous les produits doivent avoir été cueillis au plus tard Θ_k périodes après maturité et sortis du stockage de la chambre froide après B_p périodes au plus.

2.3 La modélisation des itinéraires techniques

Les itinéraires techniques sont le cœur de notre modèle. Ils définissent les ressources (gamme de surface, main d'œuvre, capital, intrants) nécessaires à l'obtention des produits. Nous développons une modélisation spécifique des itinéraires techniques. Selon Sebillotte (1974), un *itinéraire technique* désigne une séquence logique d'opérations de culture qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée. Pour un produit p, plusieurs itinéraires techniques k peuvent être mis en œuvre (figure 2.4). Le producteur choisit la meilleure combinaison d'itinéraires techniques pour atteindre ses objectifs en fonction de ses contraintes. Un itinéraire technique k nécessite des équipements et des infrastructures spécifiques, qui induisent des coûts fixes (voir figure 2.5). Nous définissions pour chaque itinéraire technique une courbe de rendement au cours du temps $Y_{k,t}$ et un ensemble de tâches de culture à réaliser à chaque période t. Différents itinéraires techniques peuvent ainsi être complémentaires dans l'utilisation de la main d'œuvre et dans la réponse à la demande.

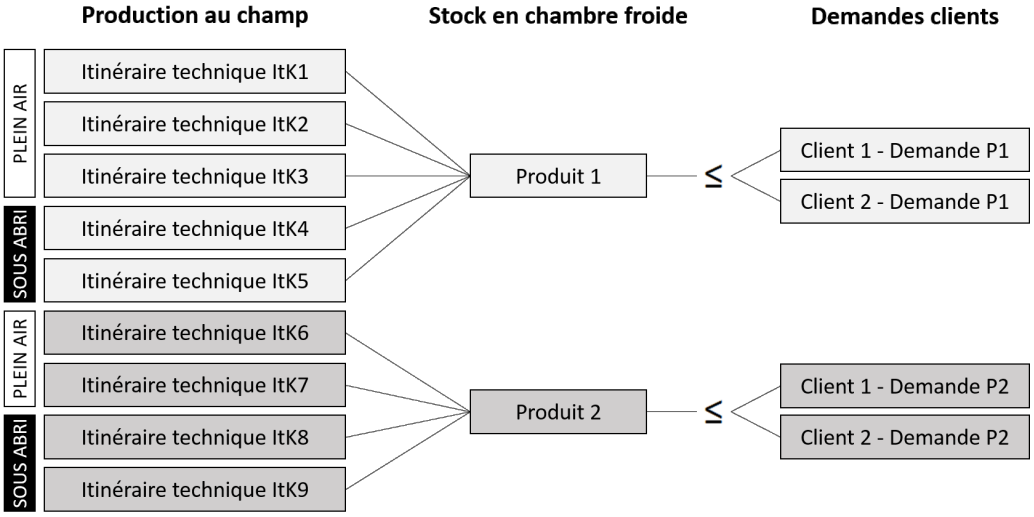


FIGURE 2.4 – *Un itinéraire technique produit un seul produit, un produit peut être obtenu avec plusieurs itinéraires techniques*

Différentes approches de modélisation des itinéraires techniques existent dans la littérature, selon l'objectif poursuivi par les chercheurs. Les modèles développés pour générer ou évaluer des rotations pluri-annuelles de cultures représentent principalement des paramètres et des relations agronomiques, liés à l'efficience de la fertilisation azotée, aux interactions entre plants successives ou au lessivage des nutriments dans le sol (Bachinger et Zander, 2007; Salassi *et al.*, 2013; Dos Santos *et al.*, 2011). Ces modèles fonctionnent généralement avec des pas de temps mensuels ou hebdomadaires. D'autres approches se focalisent sur la génération et l'évaluation d'itinéraires techniques innovants, en sélectionnant et planifiant des tâches de culture candidates, pour aller vers des pratiques agricoles plus durables. Ces approches intègrent des modèles de croissance des plantes, des séries climatiques, ainsi que des modèles d'interface sol-plant-atmosphère avec des pas de temps journaliers (Stockle *et al.*, 2003; Ko *et al.*, 2009). Ces modèles sont définis pour une gamme étroite de cultures très étudiées (blé, maïs ou tomate), et nécessitent de grandes quantités de données qui ne sont pas disponibles pour toutes les espèces et les variétés qui sont cultivées sur une ferme maraîchère diversifiée.

Nous cherchons à exprimer les complémentarités et les concurrences générées par la combinaison d'itinéraires techniques, afin de répondre au mieux à la demande et d'optimiser l'utilisation des ressources. La modélisation des itinéraires techniques doit permettre une planification tactique

satisfaisante sans être trop détaillée pour garantir une saisie rapide des données ainsi que des temps de résolution raisonnables. Nous avons donc adapté différentes approches pour obtenir une modélisation adaptée à notre contexte. Pour chaque itinéraire technique k, nous proposons une formulation incluant les trois types de données suivants.

— **Les données structurelles** définissent les paramètres généraux, que sont la gamme de surface sur laquelle peut être mis en œuvre l'itinéraire technique $[A_k^{min}, A_k^{max}]$ ainsi que des coûts fixes (Sc_k) et variables (Vc_k) liés aux investissements nécessaires à la culture. La productivité et les montants d'investissement peuvent différer largement selon que le produit est cultivé dans un potager de 10 m^2 ou dans une serre automatisée de trois hectares.

— **Les données de production** incluent la courbe de production $Y_{k,d}$ (ou courbe de rendement), i.e. la quantité de produit atteignant leur maturité à la période t pour 1 m^2 cultivé. Ces données incluent aussi les rendements de cueille - la quantité de produit qu'un ouvrier peut récolter en une heure - pour les produits commercialisables ρ_k et les produits perdus $\overline{\rho}_k$; le délai maximal avant récolte Θ_k et la fonction de perte au champ $L_{k,\theta}$.

— **Les données sur les tâches de culture** décrivent les opérations nécessaires, outre la récolte, à la culture des fruits et légumes, comme l'installation des équipements annuels, la plantation ou la taille des végétaux. Chaque tâche j est caractérisée par un temps de main d'œuvre nécessaire à sa réalisation $D_{k,j}$ par m^2 et un coût d'intrant $C_{k,j}$ par m^2 ; elle est divisible et doit être réalisée sur toute la surface de la parcelle pendant la fenêtre de temps $F_{k,j}$,

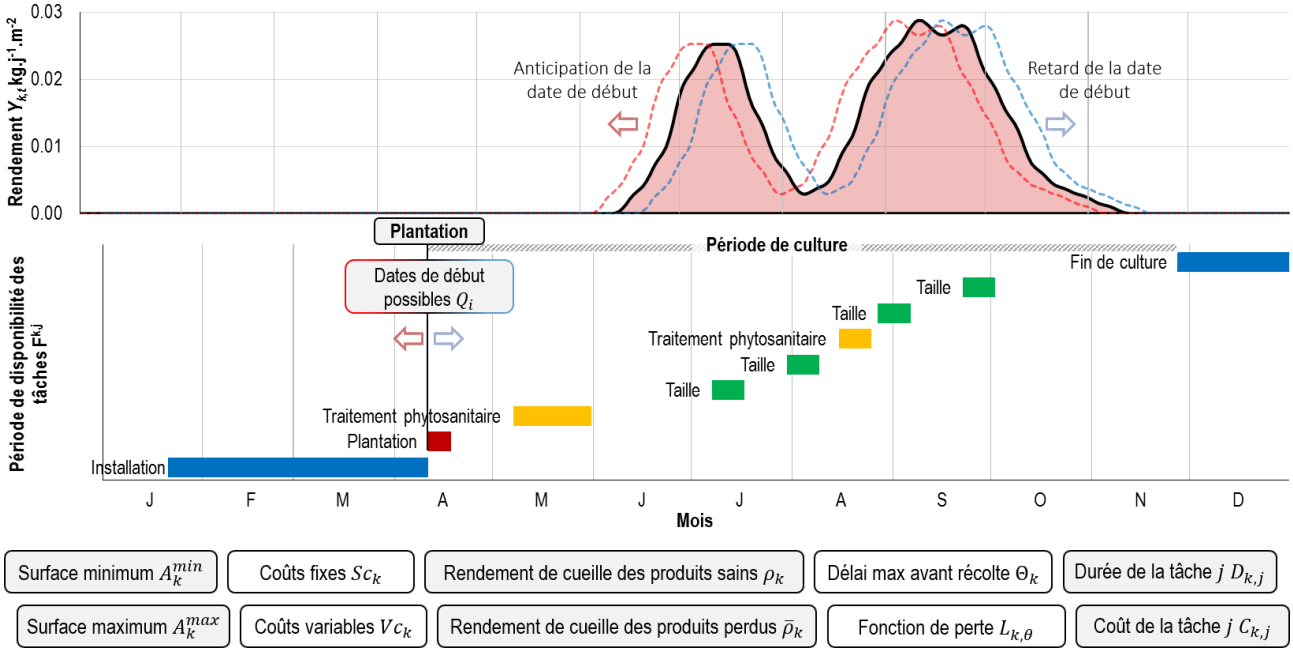


FIGURE 2.5 – *Un itinéraire technique est un ensemble cohérent de données décrivant la production, les tâches de culture et les paramètres généraux pour obtenir un produit. Exemple d'une fraise remontante cultivée sur gouttière*

La date de début de l'itinéraire technique (c'est-à-dire la date de la première tâche) *peut être avancée ou retardée de plusieurs jours, dans une certaine fenêtre calendaire*. Nous modélisons ces glissements de dates de début en définissant un ensemble Q_k de décalages de dates q pour chaque itinéraire technique k. La courbe de production et les fenêtres de temps des tâches suivent le décalage de la date de début. Nous définissons des fenêtres calendaires réduites, de l'ordre d'une à deux semaines, au sein desquelles un changement de date de début n'entraîne pas de modification

de la courbe de production. Ahumada et Villalobos (2011a) modélisent des fenêtres calendaires plus étendues, de plusieurs semaines, chaque semaine de début étant associée à une courbe de production spécifique.

Nous cherchons à trouver le meilleur dimensionnement tactique et stratégique d'une ferme. Les fenêtres de temps des tâches sont suffisantes pour obtenir une solution stratégique réaliste sans avoir besoin de considérer des relations de précédence entre les tâches. De plus, nous définissons chaque itinéraire technique pour une zone climatique spécifique. Étant donné le niveau de décision cherché, nous n'avons pas besoin d'intégrer des modèles de croissance de plante dépendant du climat.

2.4 La modélisation de la main d'œuvre dans les systèmes de production agricoles

La main d'œuvre est une des ressources clés pour l'entreprise agricole. La main d'œuvre compétente est rare et chère dans de nombreux contextes et notamment en zone urbaine. La concurrence des emplois urbains moins pénibles et plus rémunérateurs accroît l'intérêt d'optimiser l'utilisation de la ressource main d'œuvre sur l'exploitation agricole (Gonzalez-Araya *et al.*, 2015). Dans certains cas, le travail peut être la ressource la plus limitante pour l'activité agricole (Ahumada et Villalobos, 2011b). En agriculture, le temps de travail, notamment pour le travail familial, n'est pas valorisé et est fréquemment rémunéré bien en deçà du salaire horaire moyen des autres secteurs d'activités (Cochet, 2011a). Il nous semblait important de prendre en compte le temps de travail et sa valorisation dans les choix techniques et économiques de la ferme. Dans leurs travaux, Hostiou *et al.* (2015) montrent que la gestion de la main d'œuvre est propre à chaque ferme en fonction de la structure de production, des ressources disponibles, de la combinaison d'activités et des techniques pratiquées. Nous cherchons à reproduire l'affectation de la main d'œuvre telle qu'elle peut se faire dans une exploitation réelle.

Nous définissons différents profils de main d'œuvre, comme présenté sur la figure 2.6. Pour chaque profil de main d'œuvre, nous définissons un nombre d'heures travaillées par semaine ou par période, un coût horaire ou mensuel et une efficacité au travail. Dans les contrats agricoles, le nombre d'heures travaillées chaque semaine peut varier au cours de l'année pour suivre la saisonnalité de la production agricole. Comme Gonzalez-Araya *et al.* (2015), nous considérons qu'un ouvrier permanent est généralement plus efficace et expérimenté qu'un ouvrier saisonnier, ne serait-ce que par sa connaissance de la ferme. Pour obtenir une solution réaliste, nous définissons un nombre maximal d'ouvriers de chaque profil qui peuvent être engagés, ainsi que des périodes de disponibilité de ces ouvriers en fonction de la durée de leur contrat. Le principe de modélisation de la main d'œuvre que nous proposons permet de s'adapter à des situations très variées : non-salariés agricoles, salariés, entraide, bénévolat, etc.

La figure 2.6 présente les profils de main d'œuvre définis pour le cas concret présenté à la fin de ce chapitre. Nous définissons des profils d'ouvriers permanents et saisonniers, avec des différentes d'efficacité, de productivité selon les catégories. Parmi ces profils, nous définissons des profils d'ouvriers permanents, nommés chef de culture ici. Présents sur la ferme tout au long de l'année, ils sont expérimentés et efficaces et demandent un salaire élevé (pour le milieu agricole), de l'ordre de 2600 € chargé par mois. Différentes durées de contrats saisonniers sont proposées ici, de 2 à 5 mois. Ces salariés sont considérés moins expérimentés dans le cas étudiés, car ce sont souvent des étudiants sans expérience agricole. Ils sont rémunérés autour de 2300 € chargé par mois pour un temps complet. Nous étudions ici deux variantes des profils, avec des contrats à 5 ou 6

jours travaillés par semaine, avec un nombre d'heures hebdomadaires constant. Enfin, des contrats d'intérim peuvent être utiles ponctuellement pour gérer des pics de travail. Ils sont considérés moins efficaces et coûtent plus cher à l'heure de travail, comme dans Ahumada et Villalobos (2011b).

Comme pour les itinéraires techniques, les dates d'embauches des salariés peuvent être choisies dans une fenêtre calendaire donnée (représentée par les lignes horizontales sur la figure 2.6). Cela permet d'ajuster au mieux la main d'œuvre aux besoins de l'entreprise agricole, tout en respectant les contraintes réglementaires et la disponibilité de la main d'œuvre dans le contexte étudié.

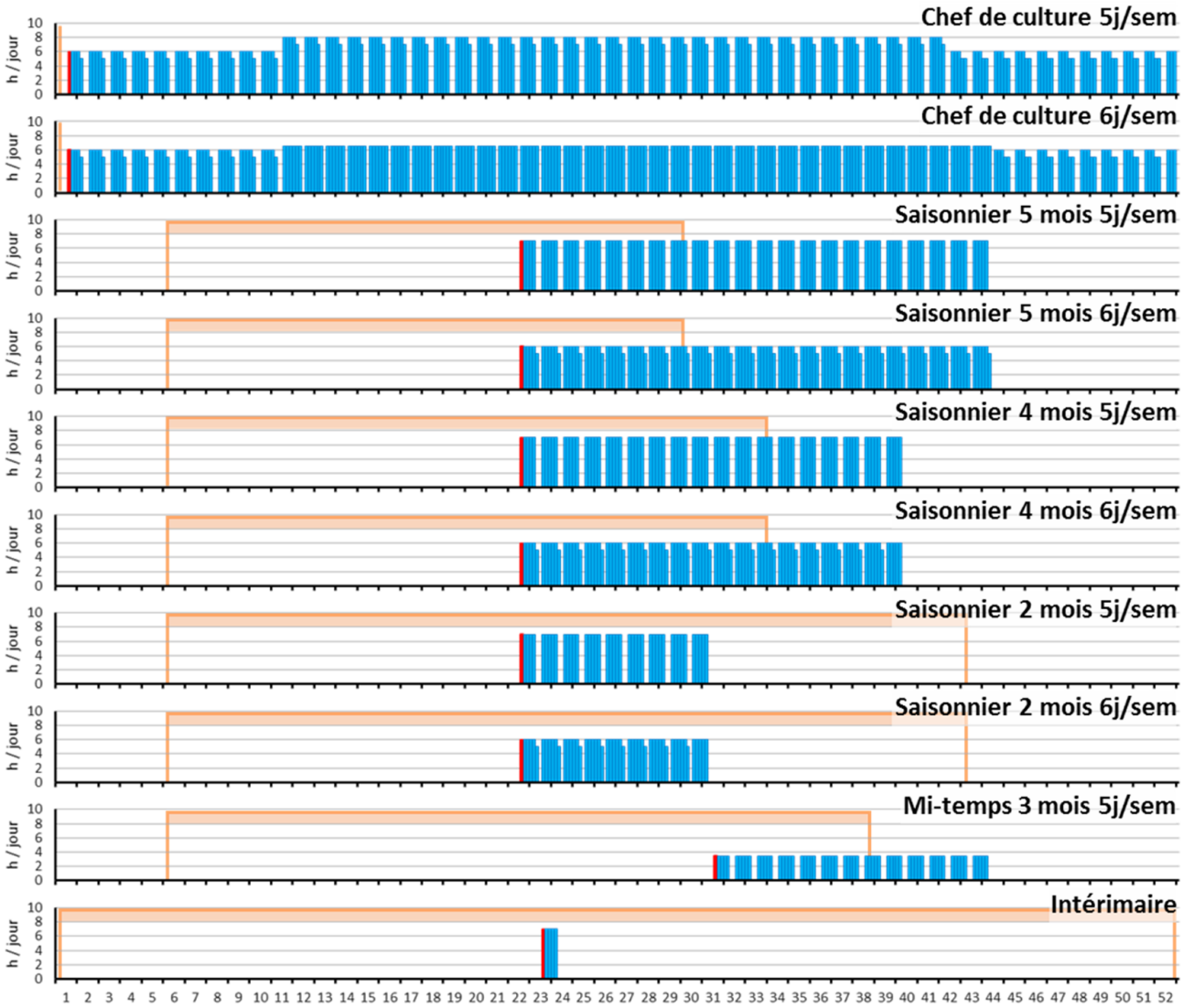


FIGURE 2.6 – *Profils de main d'œuvre définis dans l'instance : nombre d'heures travaillées par jour (barres verticales) et période possible d'embauche (barre horizontale)*

Prendre en compte la périssabilité des produits, les glissements des dates de mise en œuvre des itinéraires techniques et d'emploi des salariés lie fortement le dimensionnement stratégique et la planification tactique dans notre modèle. Intégrer des décisions tactiques liées à la périssabilité permet de proposer des solutions avec des surfaces cultivées plus grandes, une meilleure réponse à la demande et un meilleur lissage des pics d'activité. La surface des parcelles influe sur les besoins en infrastructures et en équipements de culture, et ainsi sur le dimensionnement global de la ferme.

Ensembles	
$t, t' \in T$	périodes
$p \in P$	produits
$k \in K$	itinéraires techniques, et par extension, parcelles exploitées avec ces itinéraires techniques
$w \in W$	catégories d'ouvriers
$q \in Q_k, \forall k \in K$	décalages temporels des itinéraires techniques
$j \in 0..J_k, \forall k \in K$	ensemble des tâches de cultures de l'itinéraire technique k
$c \in Cl$	clients
$\theta = 0..\Theta_k, \forall k \in K$	durée de stockage des produits sur pied, au champ
$\beta = 0..B_p, \forall p \in P$	durée de stockage des produits en chambre froide
Paramètres généraux	
A_{tot}	surface totale disponible (m^2)
Λ	nombre maximal de parcelles ou d'itinéraires techniques
$\Delta_{c,p,t}$	demande du client c en produit p à la période t (kg)
$\Pi_{c,p,t}$	prix de vente du produit p à la période t (€/kg ou €/unité)
$\Lambda_{p,\beta}$	fonction de perte en chambre froide pour le produit p
$\widetilde{\pi}_{c,p,\theta,\beta}$	réduction du prix de vente du produit p au client c en fonction du temps de stockage sur pied θ et en chambre froide β
S_{max}	capacité de stockage en chambre froide (kg)
Paramètres d'un itinéraire technique $k \in K$	
A_k^{min}	surface minimale de culture (m^2)
A_k^{max}	surface maximale de culture (m^2)
$L_{k,\theta}$	fonction de perte au champ
Sc_k	coût fixe lié au lancement d'une culture (€)
Vc_k	coût variable lié au lancement d'une culture (€/m^2)
$Q_k \subseteq T$	ensemble des dates de début possible, contigu dans notre problème
$Y_{k,t}$	rendement par période (kg/m^2)
$\Phi_{p,k}$	booléen, $= 1$ si l'itinéraire technique k génère le produit p
ρ_k	rendement de récolte au champ (kg/h)
J_k	ensemble des tâches de l'itinéraire technique k
$C_{k,j}$	coût des intrants pour la tâche j (€/m^2)
$F_{k,j}$	fenêtre de temps pour réaliser la tâche j
$D_{k,j}$	durée de la tâche j (h/m^2)
Paramètres de la main d'œuvre	
$R_w \subseteq T$	période d'emploi possible d'un ouvrier de la catégorie w
Υ_w	effectif maximal d'ouvriers de la catégorie w pouvant être employés (disponibles sur le marché du travail ou limite fixée par le producteur)
σ_w^{tot}	salaire horaire des ouvriers de la catégorie w
$H_{w,t}$	heures de travail à la période t pour la catégorie w
l_w	durée du contrat de travail (en périodes)
e_w	efficacité d'un ouvrier de catégorie w
$co_0^{mg}, co_K^{mg}, co_W^{mg}$	coefficients de calcul du temps de management

TABLE 2.1 – *Ensembles, indices et paramètres du modèle*

3 Le modèle de planification tactique en programmation linéaire mixte

Nous présentons dans cette partie le modèle multi-techniques, multi-produits et multi-clients que nous proposons. Ce modèle en programmation linéaire mixte (MILP) permet une planification tactique des tâches d'une ferme maraichères, en intégrant des décisions stratégiques. Nous montrerons dans cette partie que le modèle peut se lire comme un problème de sac-à-dos multi-dimensionnel et multi-choix couplé à un problème de dimensionnement de lot à deux niveaux, deux problèmes d'optimisations classiques. L'horizon de planification et les pas de temps choisis peuvent correspondre à un modèle tactique et opérationnel, mais le modèle est conçu pour des décisions stratégiques et tactiques. Il aide à définir les investissements et la main d'œuvre nécessaires pour la saison suivante. La structure des données et la formulation du modèle ne permettent pas d'aide à la prise de décision opérationnelle.

Les indices, les paramètres et les variables sont introduits dans les tables 2.1 et 2.2. La figure 2.7 donne une vue d'ensemble du modèle, pour aider à comprendre les contraintes liant les variables.

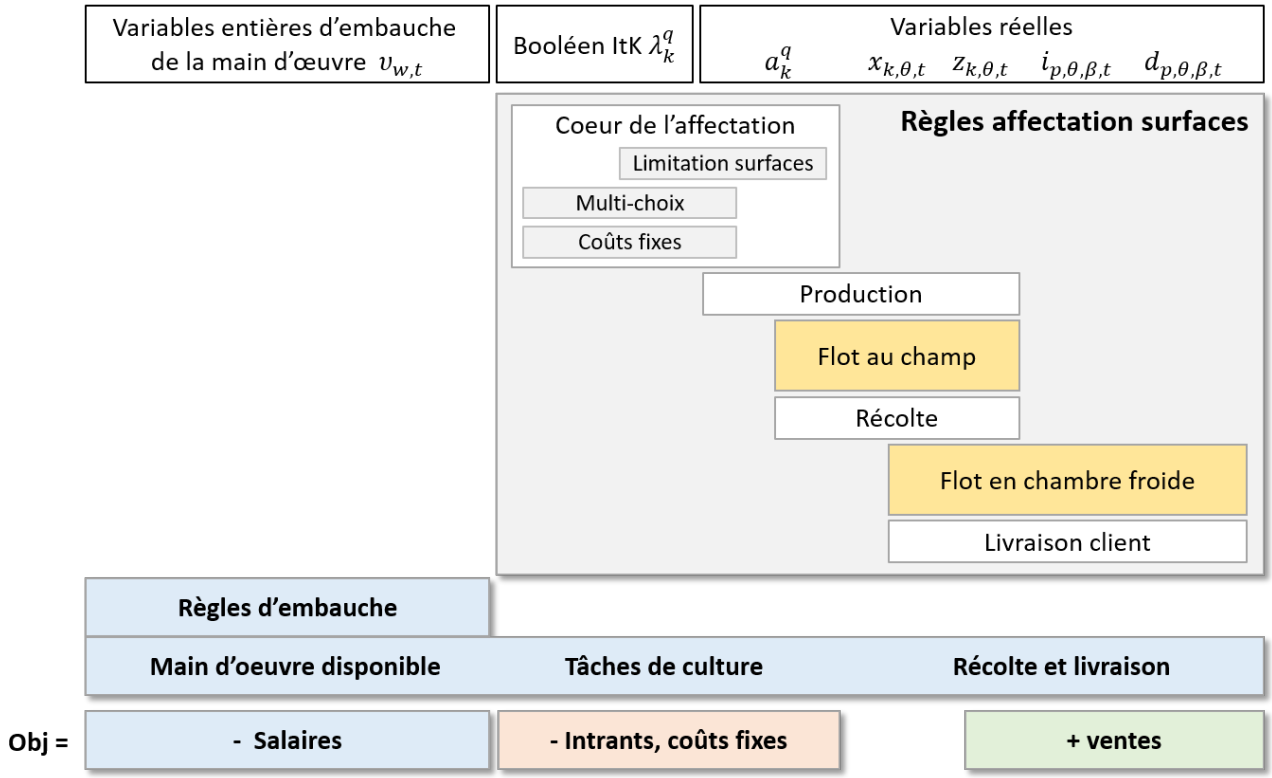


FIGURE 2.7 – *Représentation synthétique du modèle, d'après le travail de stage de Dutrieux (2016). ItK = itinéraire technique*

3.1 Maximiser le revenu de la ferme

Nous cherchons à maximiser le revenu économique Rev de la ferme. Les recettes correspondent aux ventes des produits $d_{c,p,\theta,\beta,t}$ aux clients c selon leurs demandes $\Delta_{c,p,t}$. Les prix de ventes $\Pi_{c,p,t}$ sont réduits d'un taux $\widetilde{\pi}_{c,p,\theta,\beta}$, fonction de réduction du prix en fonction de l'âge des produits, pour tenir compte de la sensibilité des clients à la fraîcheur des produits (2.1).

Variables de décision du modèle	
a_k^q	surface cultivée selon l'itinéraire technique k avec un décalage de début q (m^2)
λ_k^q	booléen, $= 1$ si le décalage q est sélectionné pour l'itinéraire technique k
$\alpha_{k,q,j,t}$	surface sur laquelle est réalisée la tâche de culture j à la période t pour l'itinéraire technique k ayant un décalage q
$x_{k,\theta,t}$	quantité de produits commercialisables d'âge θ disponibles sur la parcelle k à la période t
$\bar{x}_{k,\theta,t}$	quantité de produits perdus d'âge θ disponibles sur la parcelle k à la période t
$z_{k,\theta,t}$	quantité des produits commercialisables d'âge θ cueillis sur la parcelle k à la période t
$\bar{z}_{k,\theta,t}$	quantité des produits perdus d'âge θ cueillis sur la parcelle k à la période t
$i_{p,\theta,\beta,t}$	quantité de produits p commercialisables, récoltés à l'âge θ et stockés depuis β périodes dans la chambre froide, disponible à la période t
$\bar{i}_{p,\theta,\beta,t}$	quantité de produits p perdus, récoltés à l'âge θ et stockés depuis β périodes dans la chambre froide, disponible à la période t
$d_{c,p,\theta,\beta,t}$	quantité de produits p commercialisables, récoltés à l'âge θ et stockés depuis β périodes dans la chambre froide, livrée au client c à la période t
$\bar{d}_{p,\theta,\beta,t}$	quantité de produits p perdus, récoltés à l'âge θ et stockés depuis β périodes dans la chambre froide, évacués à la période t
$\upsilon_{w,t}$	nombre entier d'ouvriers de la catégorie w commençant un contrat à la période t
h_t	temps de travail disponible à la période t
$h_{k,t}^z$	temps de travail dédié à la cueillette des produits commercialisables depuis l'itinéraire technique k à la période t
$\bar{h}_{k,t}^z$	temps de travail dédié à la cueillette des produits perdus depuis l'itinéraire technique k à la période t
$h_{p,t}^d$	temps de travail dédié à la préparation de commande en chambre froide pour le produit p à la période t
$\bar{h}_{p,t}^d$	temps de travail dédié à l'évacuation des produits perdus p de la chambre froide pour le produit à la période t
$h_{k,j,t}^J$	temps de travail dédié à la tâche de culture j à la période t pour l'itinéraire k
mg_t	temps dédié aux tâches de managements, d'entretien et de déplacement à la période t

TABLE 2.2 – *Variables du modèle*

$$\text{Max } Rev = \sum_{c,p,\theta,\beta,t,} \Pi_{c,p,t} \cdot (1 - \widetilde{\pi}_{c,p,\theta,\beta}) \cdot d_{c,p,\theta,\beta,t} \tag{2.1}$$

$$- \left(Vc_k + \sum_{j \in J_k} C_{k,j}\right) \cdot \sum_{k,q} a_k^q \tag{2.2}$$

$$- \sum_{k,q,t} Sc_k \cdot \lambda_k^q \tag{2.3}$$

$$- \sum_{t,w} \sigma_w^{tot} \cdot \upsilon_{w,t} \tag{2.4}$$

De ces recettes sont soustraits différents coûts et charges. Les coûts variables de démarrage de culture Vc_k et le coût des tâches sont proportionnels à la surface cultivée a_k^q (2.2). Les coûts fixes

de démarrage Sc_k (2.3) dépendes de la variable d'activation des itinéraires techniques λ_k^q. Enfin, les coûts de main d'œuvre comprennent la main d'œuvre permanente ou saisonnière et la main d'œuvre intérimaire (2.4).

3.2 Contraintes du problème

Nous cherchons la combinaison d'itinéraires techniques et la combinaison de profils de main d'œuvre qui maximise le revenu tiré de la surface disponible A_{tot}. Nous définissons des contraintes de type "sac-à-dos" sur le choix des itinéraires techniques.

? Le problème de sac-à-dos

Le problème du sac-à-dos - *knapsack problem* - est un problème d'optimisation très étudié en Recherche Opérationnelle. Vous préparez votre départ en vacances et vous disposez d'un sac à dos ayant une capacité donnée, disons 20 kg. D'autres part, vous disposez de n objets i que vous souhaitez emporter en vacances, chaque objet ayant un poids w_i et une valeur p_i (valeur monétaire, sentimentale, utilité de l'objet i). La somme des poids w_i des objets dépasse la capacité du sac à dos. Vous êtes face à un problème d'optimisation : quel ensemble d'objets parmi les n devez-vous emporter avec vous pour maximiser la valeur du chargement, tout en respectant la capacité du sac ?
Ce problème d'apparence simple est en réalité complexe à résoudre sur de grosses instances et, à l'heure actuelle, on ne connait pas d'algorithme polynomial pour résoudre le problème en temps polynomial (Martello et Toth, 1990; Shih, 1979). Le problème de sac-à-dos faite partie des 21 problèmes définis comme NP-complets* par Karp (1972). De nombreux travaux de recherche explorent des méthodes de résolutions rapides de ce problème, en raison du grand nombre d'applications de variantes du cas présenté dans la vie réelle. Nous nous trouvons ici avec un problème de sac-à-dos multidimensionnel, multipériode et multichoix. Multidimensionnel, car les objets "itinéraires techniques" sont définis par rapport à différentes capacités du système : la surface totale, la main d'œuvre disponible et la demande. Multipériode, car les objets sont définis dans le temps, ce qui impose une optimisation globale et non période par période. Et multichoix, car un décalage de date de début peut être choisi pour chaque objet parmi un ensemble de décalages possibles. C'est ce problème que nous allons vous présenter avant d'aborder sa complexité.

* voir la section consacrée à à la complexité des problèmes pour la définition de NP-complet.

La surface cultivée avec les différents itinéraires techniques k ne peut dépasser la surface disponible A_{tot} (contraintes 2.5). La surface a_k^q cultivée avec l'itinéraire technique k doit appartenir à la gamme de surfaces autorisée pour cet itinéraire technique, afin que les niveaux d'équipements, les rendements et les durées de tâches soient cohérents (cont. 2.6). Des décalages des dates de démarrage des itinéraires techniques sont autorisés pour lisser les pics de travail et de production. Si un itinéraire technique est sélectionné, un seul décalage q peut être choisi (cont. 2.7). Le nombre total de parcelles et d'itinéraires techniques mis en œuvre peut être limité (cont. 2.8). Dans ce modèle, nous considérons un horizon de planification d'un an, sans successions de cultures sur une même parcelle.

$$\sum_{k,q} a_k^q \leq A_{tot} \tag{2.5}$$

$$A_k^{min} \cdot \lambda_k^q \leq a_k^q \leq A_k^{max} \cdot \lambda_k^q \qquad \forall k \in K, q \in Q_k \tag{2.6}$$

$$\sum_{q} \lambda_k^q \leq 1 \qquad \forall k \in K \tag{2.7}$$

$$\sum_{k,q} \lambda_k^q \leq \Lambda \qquad \forall k \in K, q \in Q_k. \tag{2.8}$$

Le choix des itinéraires techniques est limité par trois capacités, la surface totale A_{tot}, la demande des clients $\Delta_{c,p,t}$ et la main d'œuvre disponible, elle-même variable de décision. Nous avons conçu le modèle pour répondre à une part de la demande des clients, et non nécessairement à la demande dans sa totalité. Le marché des produits locaux de qualité est en pleine croissance et nous considérons que les clients achètent la production disponible, même si elle est inférieure à leur demande. [3]

La récolte des produits et la réalisation des tâches de culture nécessitent une main d'œuvre suffisante à chaque période t. Des contraintes de type sac-à-dos sont aussi définies pour sélectionner les profils de main d'œuvre à engager. Différentes classes w d'ouvriers sont définies pour intégrer la variété des profils intervenant sur les fermes. Le nombre d'heures de travail par période $H_{w,t}$ dépend de la catégorie. Le nombre d'ouvriers engagés $v_{w,t}$ ne doit pas dépasser les effectifs disponibles pour chaque catégorie w d'ouvriers (cont. 2.9). Les ouvriers peuvent démarrer leur contrat de travail seulement dans une certaine fenêtre calendaire R_w (cont. 2.10). Nous définissons la main d'œuvre effectivement disponible sur la ferme h_t (cont. 2.11). De la main d'œuvre intérimaire est inclue dans les profils, pour venir compléter ponctuellement la main d'œuvre sur des contrats plus longs. h_t ne correspond pas au temps total disponible, mais à l'équivalent en temps de personnel pleinement productif. En effet, le calcul de h_t fait intervenir e_w, l'efficacité de chaque type de main d'œuvre. A chaque période, la main d'œuvre h_t doit être dimensionnée pour assurer les tâches de récolte $h_{k,t}^z + \bar{h}_{k,t}^z$, la manutention des produits en chambre froide $h_{p,t}^d + \bar{h}_{p,t}^d$ ainsi que les tâches de culture $h_{k,j,t}^J$ (cont. 2.12).

Nous introduisons aussi un temps de management mg_t (cont. 2.13), afin d'intégrer les tâches de management, les déplacements d'une production à l'autre et les aléas techniques du quotidien. Dans le cas étudié par Sørensen *et al.* (2005), ce temps de management est de 15,7% du temps de main d'œuvre. Selon le chef maraîcher des Fermes de Gally, ce temps peut atteindre 20% du temps de travail. Nous n'avons pas trouvé de références bibliographiques liant le temps de management à des caractéristiques du système de production. Nous supposons qu'il existe un temps de management incompressible quelle que soit la taille de l'exploitation et que le temps de management est d'autant plus important que l'exploitation est diversifiée dans ses itinéraires techniques et qu'elle emploie une main d'œuvre nombreuse. Nous proposons une formulation de mg_t, exprimée en % de h_t avec une base fixe (coefficient co_0^{mg}), à laquelle s'ajoute des temps supplémentaires proportionnels au nombre d'itinéraires techniques mis en œuvre (coefficient co_K^{mg}) et au nombre d'ouvriers présents sur l'exploitation (coefficient co_W^{mg})à la période t.

3. Dans le chapitre 4, nous présentons un autre modèle dans lequel le producteur doit être en mesure de répondre à la totalité de la demande d'un client pour pouvoir le livrer. Au besoin, il peut compenser les produits et volumes indisponibles en pratiquant l'achat-revente de produits d'autres fermes.

$$\sum_{t \in R_w} \upsilon_{w,t} \leq \Upsilon_w \qquad \forall w \in W \qquad (2.9)$$

$$\upsilon_{w,t} \leq \Upsilon_w \cdot \mathbf{1}_{R_w}(t) \qquad \forall w \in W, t \in T \qquad (2.10)$$

$$h_t = \sum_{w \in W} \sum_{r \in 0..l_w} H_{w,t} \cdot e_w \cdot \upsilon_{w,t-r} \qquad \forall t \in T \qquad (2.11)$$

$$h_t \geq (1 + mg_t) \cdot \Big(\sum_{k \in K} (h^z_{k,t} + \bar{h}^z_{k,t}) + \sum_{p \in P} (h^d_{p,t} + \bar{h}^d_{p,t}) + \sum_{\substack{k \in K, \\ j \in J_k}} h^J_{k,j,t} \Big) \qquad \forall t \in T \qquad (2.12)$$

$$mg_t = co^{mg}_0 + co^{mg}_K \cdot \sum_{\substack{k \in K, \\ q \in Q_k}} \lambda^q_k + co^{mg}_W \cdot \sum_{\substack{w \in W, \\ r \in [t-l_w, t]}} \upsilon_{w,t-r} \qquad \forall t \in T \qquad (2.13)$$

Pour obtenir le rendement visé, le producteur et ses ouvriers doivent réaliser des tâches de culture $j \in \{0, J_k\}$ pour chaque itinéraire technique sélectionné, par exemple tailler les plantes ou désherber. Les tâches de culture peuvent être réalisées en plusieurs fois (cont. 2.14). Toute la surface mise en culture doit être traitée pendant la fenêtre de temps de réalisation de la tâche $F_{k,j}$, période qui se décale selon la date de début q choisie pour l'itinéraire technique. Le temps de main d'œuvre nécessaire pour réaliser les tâches de culture $h^J_{k,j,t}$ à la période t dépend de la surface traitée à cette période $\alpha_{k,q,j,t}$ et de la durée de réalisation de la tâche par unité de surface $D_{k,j}$ (cont. 2.15).

$$a^q_k = \sum_{t-q \in F_{k,j}} \alpha_{k,q,j,t} \qquad \forall k \in K, j \in J_k, q \in Q_k \qquad (2.14)$$

$$h^J_{k,j,t} = \sum_q D_{k,j} \cdot \alpha_{k,q,j,t} \qquad \forall k \in K, t \in T, j \in J_k \qquad (2.15)$$

Le modèle présenté jusqu'ici peut être vu comme la formulation d'un problème de sac-à-dos multidimensionnel et multichoix. Dans le problème que nous étudions, le poids des objets et leur valeur ne sont pas fixés, mais sont obtenus en fonction d'un problème de dimensionnement de lot (*lot-sizing*) et dépendent des autres objets -les itinéraires techniques- sélectionnés. En effet, nous introduisons des contraintes de dimensionnement de lot pour gérer le flux de la récolte (la production) et le stockage des produits et pour prendre en compte la périssabilité des fruits et légumes (figure 2.8), pour permettre une meilleure combinaison des itinéraires techniques eu égard à la demande client et à la main d'œuvre. Comme présenté sur la figure 2.8, un produit arrivant a maturité peut être soit cueilli immédiatement soit conservé sur pied, dans l'attente d'une récolte ultérieure. Quand il est cueilli, il est stocké en chambre froide, et peut être, de la même façon, livré immédiatement à un client ou stocké un certain temps avant livraison. Le stockage au champ et en chambre froide entraîne des pertes sur les produits périssables. Autoriser le stockage permet au producteur de différer certaines récoltes et livraisons pour cibler une demande ultérieure. Le problème de dimensionnement de lot multiproduits à deux niveaux, avec coûts fixes et seuils de capacité est lui-même NP-difficile.

? Le problème de dimensionnement de lot

Le problème du dimensionnement de lot - *lot-sizing problem* est un autre problème d'optimisation très étudié en recherche opérationnelle (Drexl et Kimms, 1997; Karimi *et al.*, 2003). Ce problème consiste à concevoir des systèmes de production et de stockage qui minimisent les coûts. Connaissant la demande en produit, les coûts de production et de stockage et les éventuelles capacités du système, quel est le plan de production le plus économe à mettre en œuvre. Le problème de dimensionnement de lot est basé sur des équations de conservation des flux d'une période à l'autre, d'une opération à l'autre. Un large champ de recherche concerne le problème de dimensionnement de lot, avec produits périssables.
Les problèmes de dimensionnement de lot sont catégorisés selon différents paramètres, parmi lesquels le nombre de machines, le nombre d'étapes de production, la présence de contraintes de capacités fixes ou variables (Brahimi *et al.*, 2006). Parmi la très grande diversité de problèmes de dimensionnement de lot courants (Dauzère-Péres *et al.*, 2013), nous pouvons citer :

- Le *Uncapacitated Lot-Sizing Problem* (USLP) consiste à planifier la production et le stockage d'un unique produit pour répondre à une demande variant dans le temps en minimisant les coûts (Brahimi *et al.*, 2006), sans contrainte de capacité. Des coûts de production et de stockage sont pris en compte, ainsi que ces coûts fixes à chaque lancement d'un nouveau cycle de production.
- Dans le *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP), des contraintes de capacités limitent la capacité de production ou de stockage à chaque période. Le cas général du problème CLSP est NP-difficile*.
- Le problème de dimensionnement de lot peut prendre en compte plusieurs produits dans le cas du *Multi-item Lot Sizing Problem* en présence de contraintes de capacités. Ce problème très combinatoire est NP-difficile au sens fort.

* voir la section consacrée à à la complexité des problèmes pour la définition de NP-difficile.

Le producteur peut différer la date de récolte au lieu de cueillir le produit sa maturité, créant des stocks sur pied. Le stock commercialisable sur pied est initialisé à $Y_{k,t-q}$ si l'itinéraire technique produit à cette période, et à zéro sinon (cont. 2.16,2.17). Le stock perdu est initialisé à zéro, puisque qu'aucune production n'est censée démarrée pourrie pour $\theta = 0$ ou $\theta \geq t$ (cont. 2.18). Le stock sur pied $x_{k,\theta,t}$, âgé de θ périodes, répond à des règles classiques de conservation des flux, qui lient les quantités stockées à la période t aux quantités stockées $x_{k,\theta-1,t-1}$ et récoltées $z_{k,\theta-1,t-1}$ de la période $t-1$ (cont. 2.19). Les quantités non récoltées à une période sont réduites par la fonction de perte $L_{k,\theta}$ (cont. 2.19). Les quantité perdues $\bar{x}_{k,\theta,t}$ sont régies par des contraintes de flux similaires (cont. 2.20). Tous les produits doivent avoir été cueillis avant l'âge de Θ_k périodes après maturité (cont. 2.21,2.22) afin d'éviter la dissémination de maladies et ravageurs. Les quantités récoltées doivent être inférieures aux quantités disponibles pour chaque âge θ (cont. 2.23,2.24).

$$x_{k,\theta,t} = \sum_q Y_{k,t-q} \cdot a_k^q \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 0 \tag{2.16}$$

$$x_{k,\theta,t} = 0 \qquad \forall k \in K, t = 0, \theta = 1..\Theta_k \tag{2.17}$$

$$\bar{x}_{k,\theta,t} = 0 \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 0 \text{ ou } \theta = t..\Theta_k \tag{2.18}$$

$$x_{k,\theta,t} \leq \left(1 - L^{(P)}_{k,\theta-1}\right) \cdot \left(x_{k,\theta-1,t-1} - z_{k,\theta-1,t-1}\right) \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 1..\Theta_k \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{k,\theta,t} &= \left(\bar{x}_{k,\theta-1,t-1} - \bar{z}_{k,\theta-1,t-1}\right) \\ &\quad + \left(x_{k,\theta-1,t-1} - z_{k,\theta-1,t-1} - x_{k,\theta,t}\right) \end{aligned} \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 1..\Theta_k \tag{2.20}$$

$$x_{k,\Theta_k,t} = 0, \qquad \forall k \in K, t \in T \tag{2.21}$$

$$\bar{x}_{k,\Theta_k,t} = 0, \qquad \forall k \in K, t \in T \tag{2.22}$$

$$z_{k,\theta,t} \leq x_{k,\theta,t} \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 0..\Theta_k \tag{2.23}$$

$$\bar{z}_{k,\theta,t} \leq \bar{x}_{k,\theta,t}, \qquad \forall k \in K, t \in T, \theta = 0..\Theta_k \tag{2.24}$$

Le même raisonnement est appliqué aux stocks en chambre froide. Le stock commercialisable initial est égal à la somme des quantités récoltées dans les itinéraires techniques k produisant le produit p (cont. 2.25,2.27), ou à zéro si aucune production n'est attendue. Les stocks de produits sont initialisés à zéro (cont. 2.26).

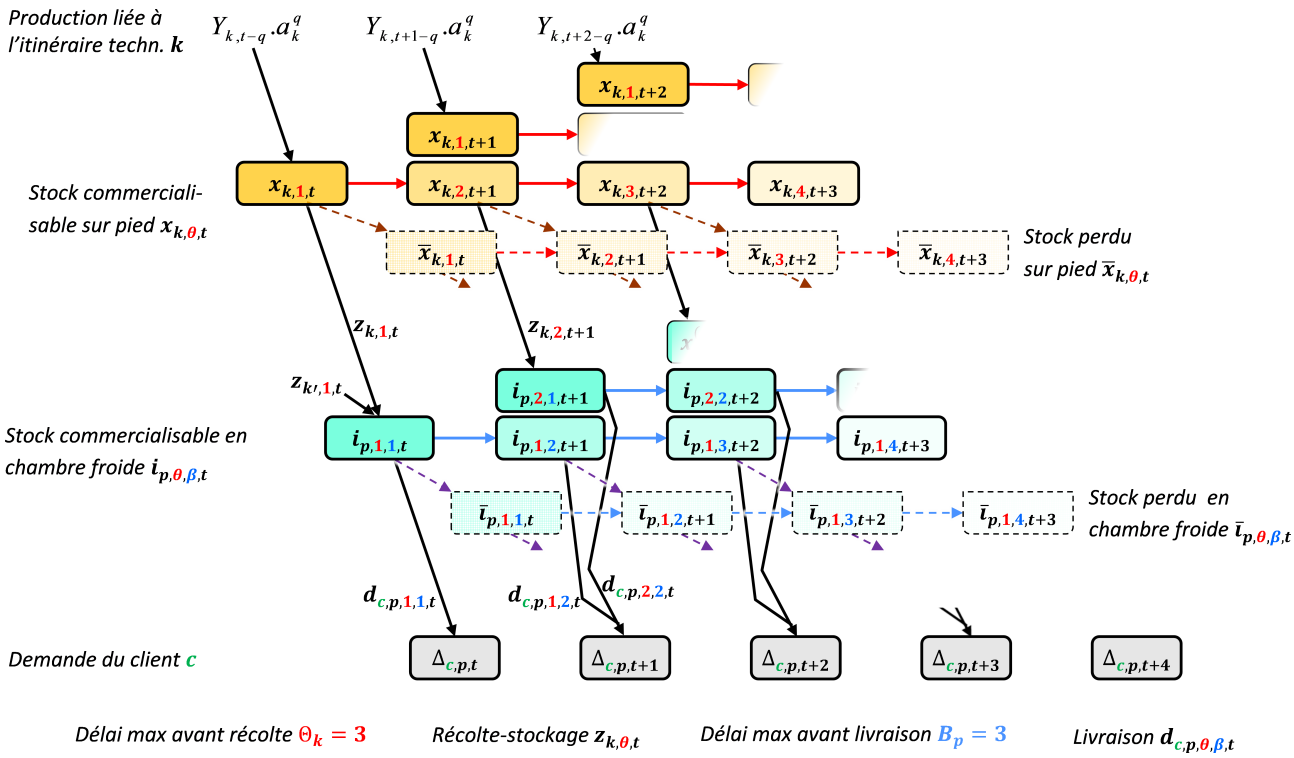


FIGURE 2.8 – *Flux de produits commercialisables et perdus du champ au client dans le modèle. La durée de conservation des produits périssables et les pertes associées à leur âge sont suivies grâce aux indices temporels θ and β.*

Des contraintes de flux sont définies pour lier les quantités commercialisables stockées $i_{p,\theta,\beta,t}$, les quantités stockées perdues $\bar{i}_{p,\theta,\beta,t}$, les quantités livrées $d_{c,p,\theta,\beta,t}$ et éliminées de la chambre froide $\bar{d}_{p,\theta,\beta,t}$, et la fonction de perte en chambre froide $\Lambda_{p,\beta}$ (cont. 2.28). Les produits en chambre froide doivent être éliminés avant l'âge de B_p périodes (cont. 2.30). La chambre froide a une capacité limitée (cont. 2.31). Les quantités livrées à chaque client ne peuvent excéder ni sa demande (cont. 2.32), ni les stocks disponibles pour chaque âge β (cont. 2.33,2.34).

$$i_{p,\theta,\beta,t} = \sum_{\substack{k \in K \\ \Phi_{p,i}=1}} z_{k,\theta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = 0 \tag{2.25}$$

$$\bar{i}_{p,\theta,\beta,t} = 0 \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta \in 0..\Theta_k, \beta = 0 \tag{2.26}$$

$$i_{p,\theta,\beta,0} = \bar{i}_{p,\theta,\beta,t} = 0, \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = t..B_p \tag{2.27}$$

$$i_{p,\theta,\beta,t} \leq (1 - L^{(S)}_{p,\beta-1}) \cdot \left(i_{p,\theta,\beta-1,t-1} - d_{c,p,\theta,\beta-1,t-1}\right) \quad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = t..B_p \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned} \bar{i}_{p,\theta,\beta,t} = & \left(\bar{i}_{p,\theta,\beta-1,t-1} - \bar{d}_{p,\theta,\beta-1,t-1}\right) \\ & + \left(i_{p,\theta,\beta-1,t-1} - \sum_{c \in C} d_{c,p,\theta,\beta,t} - i_{p,\theta,\beta,t}\right) \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = t..B_p \end{aligned} \tag{2.29}$$

$$i_{p,\theta,B_p,t} = \bar{i}_{p,\theta,B_p,t} = 0, \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \tag{2.30}$$

$$\sum_{p,\theta,\beta} \left(i_{p,\theta,\beta,t} + \bar{i}_{p,\theta,\beta,t}\right) \leq S_{max} \qquad \forall t \in T \tag{2.31}$$

$$\sum_{\theta,\beta} d_{c,p,\theta,\beta,t} \leq \Delta_{c,p,t} \qquad \forall c \in C, p \in P, t \in T \tag{2.32}$$

$$\sum_{c \in C} d_{c,p,\theta,\beta,t} \leq i_{p,\theta,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = 0..B_p \tag{2.33}$$

$$\bar{d}_{p,\theta,\beta,t} \leq \bar{i}_{p,\theta,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \theta = 0..\Theta_k, \beta = 0..B_p \tag{2.34}$$

La récolte des produits sains et périssables nécessitent une quantité de travail proportionnelle au rendements de cueille de ces produits sains ρ_k et perdus $\bar{\rho}_k$ (en kg.h^{-1}) (cont. 2.35,2.36). Le besoin de main d'œuvre pour la préparation des commandes en chambre froide est défini de la même façon (cont. 2.37,2.38).

$$h^z_{k,t} \cdot \rho_k = \sum_{\theta} z_{k,\theta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T \tag{2.35}$$

$$\bar{h}^z_{k,t} \cdot \bar{\rho}_k = \sum_{\theta} \bar{z}_{k,\theta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T \tag{2.36}$$

$$h^d_{p,t} \cdot \rho_p = \sum_{c,\theta,\beta} d_{c,p,\theta,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T \tag{2.37}$$

$$\bar{h}^d_{p,t} \cdot \bar{\rho}_p = \sum_{\theta,\beta} \bar{d}_{p,\theta,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T \tag{2.38}$$

4 Approche de la complexité du problème et amélioration de la résolution

Le problème que nous traitons peut être considéré comme la combinaison d'un problème de sac-à-dos multidimensionnel et multichoix (MMKP) et d'un problème de dimensionnement de lot (LS). Nous présentons dans cette partie une approche de la complexité du problème, ainsi que des pré-traitements que nous proposons pour améliorer la résolution du modèle. Ces éléments sont issus du travail de stage de Cyril Dutrieux (2016).

? La complexité des problèmes d'optimisation

En mathématiques et en informatique, la théorie de la complexité consiste en l'évaluation théorique de la quantité de ressources nécessaires pour résoudre un problème algorithmique. Les ressources sont principalement le temps de résolution et la consommation de mémoire pour stocker les valeurs des variables et des solutions générées par l'algorithme. L'analyse de la complexité peut aider à identifier des stratégies alternatives de résolution pour améliorer le processus, plus rapides et plus économes.

Des classes de complexité sont définies pour regrouper les problèmes dont la résolution requiert une quantité équivalente de ressources. Pour les problèmes que nous étudions, nous nous intéressons aux classes en temps P et NP. La classe P rassemble les problèmes dont la résolution peut se faire en temps polynomial, c'est-à-dire que le temps de résolution peut être approximé par un polynôme de la taille de l'instance. La classe NP rassemble des problèmes plus complexes, pour lesquels on peut vérifier qu'une solution candidate est bien une solution du problème en un temps polynomial. Les ordres de grandeur des temps de résolution sont exprimés avec l'opérateur $\mathcal{O}()$, par exemple $\mathcal{O}(n^2)$ si une approximation du temps de résolution est le carré d'une dimension n du problème.

On appelle réduction une fonction f définie sur un ensemble E qui vérifie l'équivalence $x \in L_1 \iff f(x) \in L_2$ pour tout $x \in E$, L_1 et L_2 étant deux langages de E. Si cette réduction se fait en temps polynomial, elle est dite réduction polynomiale. Un problème est dit NP-difficile si tous les problèmes de la classe NP peuvent être ramenés ce problème par une réduction polynomiale. Un problème est dit NP-complet s'il remplit la condition précédente et qu'il est possible de vérifier qu'une solution candidate est solution du problème, en temps polynomial (Garey et Johnson, 1979).

4.1 Complexité théorique du problème

Le problème de sac-à-dos multidimensionnel et multichoix est une variante plus complexe du classique problème de sac-à-dos binaire (*0-1 Knapsack Problem.*). Le *0-1 Knapsack Problem* est l'un des 21 problèmes NP-complets de Karp (1972) et la résolution de sa version multidimensionnelle et multichoix a fait l'objet de recherches relativement récentes d'heuristiques (Hifi *et al.*, 2003; Akbar *et al.*, 2006; Sbihi, 2007). Les objets principaux de notre MMKP (*Multidimensional Multiple choice Knapsack Problem*) sont les itinéraires techniques définis dans plusieurs dimensions : surface, main d'œuvre, production. Sont donnés n itinéraires techniques, chaque itinéraire k ayant Q_k dates de début possibles. Chaque date de début possible à choisir $q \in Q_k$ est associée à une valeur non négative de profit potentiel $prof_k^q = \sum_t Y_{k,t} \cdot \Pi_{p,t} - Vc_k - \sum_{j \in J_k} C_{k,j}$. Mettre en œuvre ces itinéraires

techniques nécessite des unités positives de ressources en capital et en main d'œuvre, que l'on peut considérer, en première approximation, proportionnelles à l'aire sélectionnée a_k^q. Les quantités de ressources disponibles sont données par un vecteur dimensions :

$$Res = (\text{surface totale } A_{tot},\ \text{demandes totales } \sum_{c \in C} \Delta_{c,p,t},\ \text{main d'œuvre} \sum_{\omega \in W} \Upsilon_\omega . H_{\omega,t}).$$

Notre MMKP consiste à choisir exactement une date de début pour chaque itinéraire technique sélectionné, et de déterminer la meilleure aire pour cet itinéraire techniques afin de maximiser la valeur ou le profit des itinéraires sélectionnés.

Certains itinéraires techniques valorisent mieux la ressource travail, en générant plus de profit avec moins de main d'œuvre. Cependant, le problème de sac-à-dos, tel qu'il est posé, se focalise moins sur la sélection des itinéraires techniques les plus rentables que sur la sélection de la combinaison d'itinéraires techniques multipériodes la plus profitable. Un algorithme glouton qui sélectionnerait un par un les itinéraires techniques par ordre décroissant de profit, jusqu'à saturation des capacités ne permettrait pas d'atteindre la solution optimale. Comme le montre la figure 2.9, différentes capacités peuvent être limitantes en fonction des périodes et des itinéraires techniques. Dans l'exemple de la figure, la faible demande et une main d'œuvre insuffisante limitent les surfaces cultivées. Cette limitation de surface peut aboutir, selon l'allure des courbes de production des itinéraires techniques, à des pénuries de produits à certaines périodes.

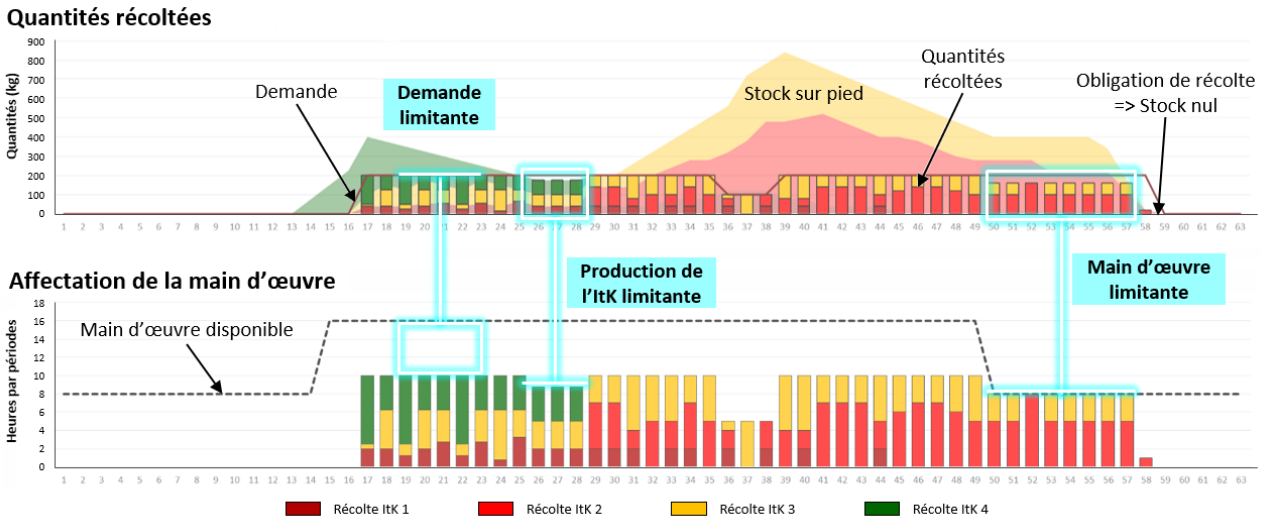


FIGURE 2.9 – *Combinaison d'itinéraires techniques en présence de capacités de demande et de main d'œuvre. Cas simple où seule la récolte des produits commercialisable est considérée, sans la récolte des produits perdus ni les tâches de culture.*

Cette première approche théorique du problème étudié nous montre qu'il est théoriquement difficile à résoudre à l'optimum pour des instances de taille importante du problème. Dans le contexte de l'étude, nous considérons qu'une instance de taille importante correspond à la planification sur 15 ans d'une ferme d'une vingtaine de parcelles, avec 40 produits possibles et 20 itinéraires techniques par produit. Des premiers essais de résolution avec le solveur commercial CPLEX 12.6 sur des instances de test artificielles ont confirmé l'augmentation rapide des temps de résolution et de la consommation de mémoire avec l'augmentation du nombre de périodes et d'itinéraires techniques. C'est la raison pour laquelle nous proposons deux prétraitements pour améliorer la résolution de problème formulé en programmation linéaire mixte.

4.2 Réduction de la taille du réseau

Le problème de dimensionnement de lot est basé sur une formulation en réseau, avec les contraintes (2.16) à (2.34), comme le montre la figure 2.8. Le réseau en question est la modélisation des liens (arrêtes) entre les différents états de produits (sommets). Des flux de matières sont modélisés pour suivre les changements d'état des produits aux différentes périodes : sur pied, récoltés, livrés, âges θ et β. Nommons $|K|$ le nombre d'itinéraires techniques, $|T|$ le nombre de périodes, $|P|$ le nombre de produits et $|C|$ le nombre de clients. La formulation du programme linéaire mixte construit $\mathcal{O}(|K||T|^2+|C||P||T|^3)$ variables, les variables concernées étant les aires des tâches de culture $\alpha_{k,q,j,t}$ et les quantités livrées aux différents clients $d_{c,p,\theta,\beta,t}$. La formulation construit $\mathcal{O}(|K||T|+|C||P||T|+|P||T|^3)$ contraintes, en nous basant sur les dimensions des contraintes (2.15), (2.32) et (2.25). Pourtant, les itinéraires techniques ne produisent qu'une partie de l'année. Le réseau construit est en grande partie vide, avec la plupart des variables fixées à zéro et de nombreuses arrêtes qui ne sont traversées par aucun flux.

Lors de la construction du modèle, nous pouvons filtrer les variables et les contraintes pour ne garder que celles qui sont utiles. Par exemple, le prétraitement ne créera une variable de stock en chambre froide $i_{p,\theta,\beta,t}$, et les contraintes qui lui sont associées, que si au moins un itinéraire technique produisant le produit p génère un rendement supérieur à zéro à la période $t-\theta-\beta$. La plupart des variables de stock et de livraison, qui ne sont pas dans le chemin entre une production positive et une demande, sont retirées, ce qui permet d'importants gains en mémoire. Ces gains sont difficiles à chiffrer a priori car ils sont très dépendants de la structure des instances de données. Par exemple, si un produit, pour lequel des itinéraires techniques sont donnés, n'est pas demandé dans une instance, aucune des variables et contraintes s'y rapportant ne sera défini. A l'inverse, il existe des instances pour lesquelles le réseau est nécessaire dans son intégralité : c'est le cas pour une instance où la demande et la production sont définies tout au long de l'année, grâce à de la culture sous serre par exemple.

4.3 Réduction de la borne supérieure des surfaces

Les contraintes (2.6) imposent que l'aire variable a_k^q de la parcelle cultivée avec l'itinéraire k, avec un décalage q, appartienne à l'intervalle $[A_k^{min}, A_k^{max}]$. La borne supérieure A_k^{max} est définie pour tenir compte des contraintes physiques des situations réelles, pour que les rendements, les coûts, les investissements et les temps de travaux soient en cohérence dans la gamme de surface. Cependant, la surface de la parcelle est souvent limitée dans le modèle en raison d'un manque de main d'œuvre ou d'une demande limitante à certaines périodes. Nous pouvons améliorer les bornes supérieures des aires en utilisant des inégalités valides (Karimi-Nasab et Seyedhoseini, 2013; Gu, 2016) : nous améliorons la relaxation linéaire en réduisant l'aire maximale A_k^{max} dans les contraintes citées, comme présenté dans la figure 2.10.

Supposons un rendement constant $Y_{k,t}$, proportionnel à la surface cultivée a_k^q pour un unique itinéraire technique k, avec une main d'œuvre constante. Le producteur peut choisir différentes stratégies de production pour répondre à une demande donnée. Sur le graphique de gauche de la figure 2.10, la surface sélectionnée permet une production intermédiaire comparée à la demande (lignes noires) : à certaines périodes, la production est excédentaire (hachures obliques), mais à d'autres périodes, la demande ne peut être pleinement satisfaite (hachures horizontales).

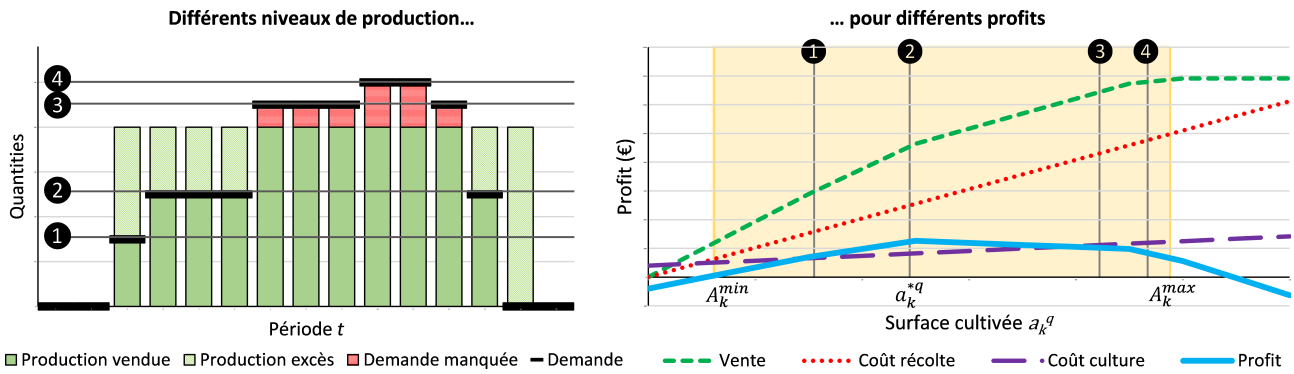


FIGURE 2.10 – *Profit généré par un itinéraire technique en réponse à une demande donnée, en fonction de la surface cultivée*

Le graphique de droite représente le profit associé à l'itinéraire technique, comme une fonction de la surface cultivée a_k^q. Ce profit est la différence entre la fonction des recettes de vente - fonction concave par morceaux, proportionnelle à la part de demande satisfaite, comme présenté sur le graphique de gauche - et une fonction linéaire de coûts de récolte, d'une part, et de culture, d'autre part. Les coûts de récolte sont proportionnels à la surface cultivés car le modèle impose de récolter les produits, même s'ils ne sont commercialisés. Les coûts de culture sont une fonction affine de la surface, avec une part fixe correspondant au coût de lancement de la culture. Quand la surface augmente, la demande est graduellement saturée à certaines périodes de l'horizon de temps et il devient moins profitable d'accroître a_k^q en raison des coûts de culture et de l'obligation de récolte (contraintes (2.21) et (2.22)). Par ailleurs, dans cet exemple, nous prenons en compte la main d'œuvre uniquement à travers les coûts de culture et de récolte. Accroître a_k^q peut de la même façon saturer la capacité en main d'œuvre à certaines périodes, ce qui complexifie la planification du travail et la réponse à la demande. Si nous prenons en compte les capacités de main d'œuvre, de nouveaux "morceaux" seraient visible sur la fonction de profit. Le profit maximal pour l'itinéraire technique, pour les caractéristiques d'une instance donnée, est obtenu pour $a_k^q = a_k^{*q}$ (point 2 sur le graphique de droite).

L'écart entre A_k^{max} et les bornes imposées par la demande et la main d'œuvre participe à la faiblesse de la relaxation linéaire dans les contraintes (2.6) qui jouent un rôle similaire à des contraintes de type "Grand M". Nous proposons un prétraitement qui resserre A_k^{max} pour chaque itinéraire technique k. La main d'œuvre pour chaque période est fixée à sa valeur maximale dans l'instance, c'est-à-dire la somme des heures travaillées pour tous les profils pouvant être engagés à cette période. Le prétraitement est effectué pour chaque couple (k, q). La valeur a_k^{*q} dans la solution optimale de ce problème est une borne supérieure de a_k^q pour le problème général. Cette borne sera de fait restreinte par la main d'œuvre variable et la compétition entre itinéraires techniques pour utiliser les ressources. En outre, si le profit de l'itinéraire technique pour la surface a_k^{*q} est négatif, l'itinéraire technique n'est pas rentable compte-tenu des paramètres de l'instance (par exemple, cas d'une demande insuffisante ou de prix trop faibles pour couvrir les coûts de production), et l'itinéraire technique est retiré des données.

5 Résultats numériques et analyse des performances du modèle

Nous proposons ici deux approches de validation du modèle. Nous présentons tout d'abord la comparaison des résultats du modèle et des données récoltées sur le terrain dans le cas d'une ferme expérimentale pilotée par les *Fermes de Gally*. Nous étudierons ensuite les performances du programme linéaire sur des instances de test artificielles, générées à partir de données agricoles.

5.1 Etude sur Les Fermes en Villes

Présentation de la ferme

En 2014, les Fermes de Gally ont démarré un projet de ferme urbaine expérimentale sur une ancienne friche péri-urbaine proche de Versailles, c'est le projet *Les Fermes en Villes*[4]. Des filets anti-insectes ont été installés sur une surface d'un hectare pour produire en hors-sol une gamme réduite de fruits et légumes à forte valeur ajoutée. Tomates cerise, fraises et framboises sont cultivées en un seul cycle de culture en saison, pour être vendues en circuits courts et locaux. Nous avons récolté les données liées à la production et à la main d'œuvre auprès du chef de culture pour tester le modèle sur un cas réel.

FIGURE 2.11 – *Tomates, fraises et framboises hors-sol aux Fermes en Villes (source : Gally)*

Nous nous intéressons au plan de plantation pour la saison 2015 (voir figure 2.14). Cette année là, six variétés de fraises ont été plantées, avec différentes dates de plantation. Des variétés, dites "saison", produisent entre mai et juillet. D'autres, dites remontantes, fleurissent plusieurs fois et peuvent ainsi produire de mai à octobre. Une variété saison et une variété remontante de framboisiers étaient déjà en place, plantées l'année précédente. Enfin, plusieurs variétés de tomates cerise furent plantées en une seule session de plantation. Elles sont toutes conduites selon le même itinéraire technique et diffèrent seulement par la forme et la couleur des fruits. Nous les assimilons à un unique itinéraire technique dans les données du modèle.

Une part importante notre travail fut la collecte et la structuration des données pour tester le modèle. L'aire totale est A_{tot} est fixée à 11000 m^2, la surface réellement cultivée sur la ferme urbaine. Les itinéraires techniques sont définis en agrégeant un grand nombre de sources de données, parmi lesquelles Africano *et al.* (2010) et les données des Fermes de Gally, que nous avons synthétisées en une instance de données adaptée au contexte climatique francilien. Les dates de début des itinéraires techniques peuvent être décalées dans l'intervalle d'une semaine plus tôt à une semaine plus tard. La

4. Site internet des Fermes en Villes : www.lesfermesenvilles.com

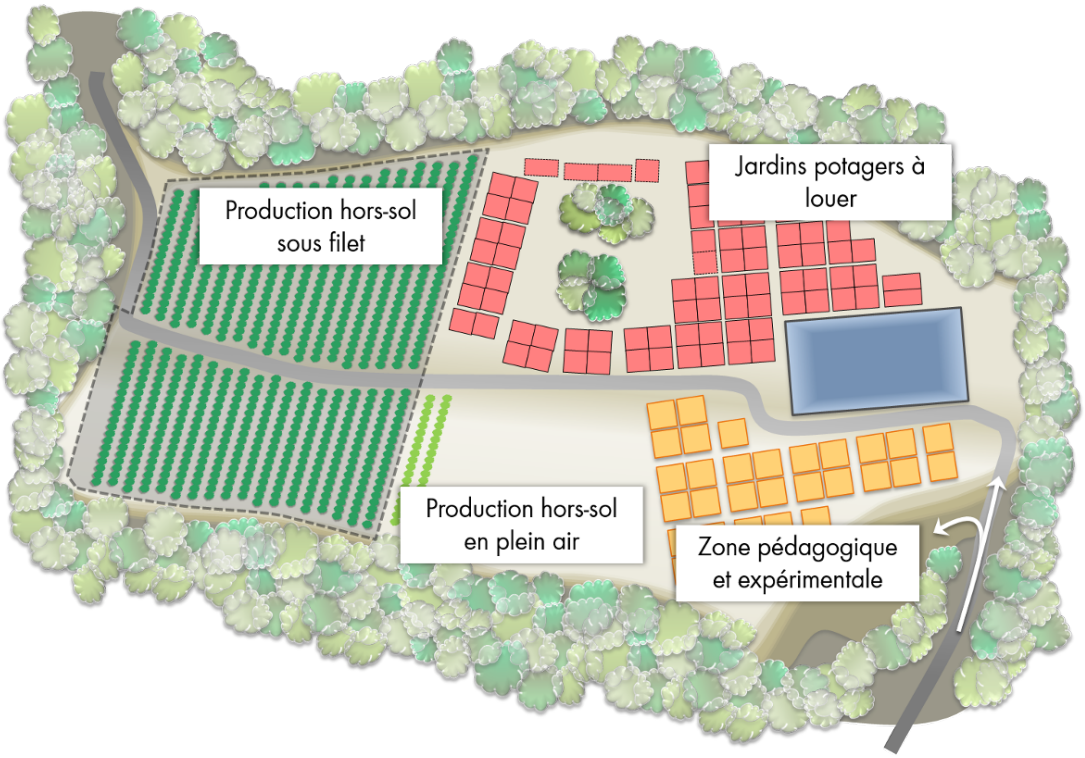


FIGURE 2.12 – *Plan du démonstrateur d'agriculture urbaine des Fermes de Gally*

périssabilité des produits est définie comme présenté en section 2.2.2. Les profils de main d'œuvre sont définis à partir d'exemples de contrats classiques en agriculture. Pour une même catégorie de travailleurs, deux distribution du temps de travail sont proposées, avec cinq ou six jours ouvrés par semaine. Nous définissons un temps de management simplifié dans l'équation (2.13), égal à 10% du besoin en main d'œuvre à chaque période. La demande est fixée bien supérieure à la capacité de production, puisque nous nous plaçons dans un contexte de marché croissant pour des produits locaux de qualité comme ceux cultivés sur la ferme. Dans le cas des *Fermes en Villes*, les prix pratiqués sont constants au cours de l'année. Pour la saison de culture étudiée, les prix sont fixés comme suit : 6,75 €/kg de fraises, 14 €/kg de framboises et 6 €/kg de tomates cerise.

Méthodologie de test du modèle et résultats numériques

Notre objectif ici est de tester le modèle en simulation plus qu'en optimisation, en fixant les paramètres pour pouvoir comparer les résultats du modèle et ceux constatés sur la ferme. Nous fixons arbitrairement la gamme de surface $[A_k^{min}, A_k^{max}]$ de chaque itinéraire technique à partir de la surface réellement cultivée sur la ferme : $A_k^{min} = 50\% \cdot A_k^{\text{farm}}$ et $A_k^{max} = 150\% \cdot A_k^{\text{farm}}$. Nous fixons un effectif maximal Υ_w d'ouvriers employables pour chaque catégorie de main d'œuvre w (voir figure 2.15).

Le programme linéaire mixte est résolu avec CPLEX 12.6 sur un processeur Intel Core i7-4600U 2.10 GHz avec 8 Go de RAM.

La construction d'instances avec différents pas de temps. Nous testons quatre pas de temps pour valider le modèle sur un horizon de planification d'un an : 364 périodes de 1 jour, 182 périodes

de 2 jours, 91 périodes de 4 jours et 52 périodes d'une semaine. Les données initiales sont définies pour 364 périodes de 1 jour et un prétraitement nous permet de générer les données au pas de temps souhaité, comme illustré en figure 2.13. Les rendements, les demandes ou les heures de travail par jour sont sommés sur le nombre de jours contenus en une période, quand les prix de vente sont moyennés. Le délai maximal avant récolte Θ_k et la durée maximale de stockage B_p sont divisés par le nombre de jours par période et arrondis à l'entier supérieur. Les fonctions de pertes L'_{per} sont calculées selon la formule $L'_{per} = 1 - \prod_{jo \in per}(1 - L_{jo})$, avec per la période considérée, jo les jours de l'instance de base à 364 périodes de 1 jour. Comme le montre la figure 2.13, le changement de pas de temps entraîne des pertes d'autant plus rapides que le pas de temps est grand. Sur le graphique de la figure 2.13, il est toujours possible de livrer des tomates conservées plus de 7 jours en chambre froide avec un pas de temps de 1 jour, alors qu'elles sont considérées intégralement perdues au même âge avec un pas de temps d'une semaine.

Production (kg/jour ou kg/période)

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
364 pér. de 1 jour	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	0	0	0
182 pér. de 2 jours	0		0		1		4		4		6		6		6		2		2		6		6		3		0	
91 pér. de 4 jours	0				5				10				12				4				12				3			
52 pér. de 7 jours	3								18						13							12						

Fonction de perte (% du volume restant)

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
364 pér. de 1 jour	0%	5%	10%	10%	20%	20%	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%
182 pér. de 2 jours	5%		19%		36%		76%		100%		100%		100%	
91 pér. de 4 jours	23%				85%				100%					
52 pér. de 7 jours	70%								100%					

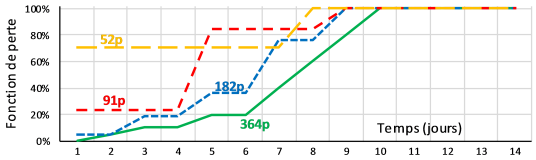


FIGURE 2.13 – *Principe de transformation des données pour obtenir les différents pas de temps*

La table 2.3 compare les résultats économiques de la ferme en 2015 avec les solutions obtenues par le programme linéaire mixte pour différents pas de temps. La ferme étudiée n'avait pas d'expérience récente des itinéraires techniques envisagés et le chef d'exploitation a déterminé l'objectif technique et économique à partir de données issues d'autres fermes. Ces données étaient agrégées en résultats annuels : rendement, main d'œuvre, coûts. La main d'œuvre nécessaire a été fixée à un responsable à temps plein et trois saisonniers sur des contrats de 6 mois. Dans ces conditions, le projet devait générer une marge contributive.

En 2015, nous avons porté une attention particulière aux processus et aux résultats de la ferme, et avons récolté des données afin d'améliorer la productivité. Durant cette saison de culture, la ferme a subi de sévères attaques de mouche du fruit, la *drosophile suzuki*, sur les fraises et les framboises, ainsi que de mildiou sur les tomates en raison d'un dispositif anti-pluie défectueux. Il a fallu consacrer plus de main d'œuvre que prévu au ramassage des fruits attaqués pour éviter la propagation des maladies et des ravageurs. Cela explique les mauvais résultats de la saison 2015 par rapport au prévisionnel. Cependant, nous avons décidé de modéliser 2015 étant donné les nombreuses informations récoltées cette année.

Les résultats techniques et économiques. Avec le pas de temps le plus fin, 364 périodes de 1 jour, la solution du programme linéaire mixte donne des ordres de grandeurs réalistes pour les quantités produites et le coût du travail coûts du travail, et sous-estime les coûts liés aux tâches de culture (coûts des intrants). Cet écart important s'explique par la difficulté de trouver les temps et durées des tâches pour certaines cultures d'après les données récoltées sur la ferme et dans la littérature. Les problèmes exceptionnels de maladies et ravageurs ne sont pas pris en compte dans le modèle.

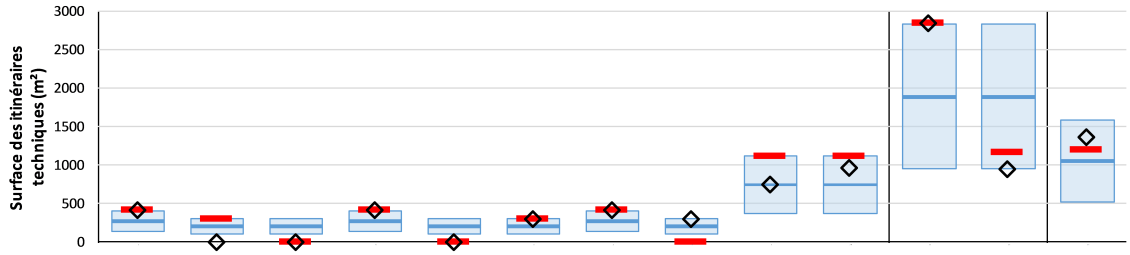
	Résultats de la ferme en 2015		Libre choix de la main d'œuvre				1 permanent imposé	
			Solution MILP	Solution MILP	Solution MILP	Solution MILP	Solution MILP	Solution MILP
Compte de résultat	**Objectif**	**Atteint**	**364 périodes**	**182 périodes**	**91 périodes**	**52 périodes**	**91 périodes**	**52 périodes**
Chiffre d'affaires	**+ 120 000 €**	**+ 61 688 €**	**+ 87 990 €**	**+ 70 340 €**	**0 €**	**0 €**	**+ 35 179 €**	**+ 16 150 €**
Ventes de fraises (kg)	*7500*	*6442*	*4010*	*3303*	*0*	*0*	*3070*	*1998*
Ventes de framboises (kg)	*2500*	*902*	*3839*	*3381*	*0*	*0*	*1500*	*690*
Ventes de tomates (kg)	*6000*	*1388*	*1196*	*1278*	*0*	*0*	*1470*	*1475*
Coûts de main d'œuvre		**+ 75 000 €**	**+ 65 000 €**	**+ 55 000 €**	**0 €**	**0 €**	**+ 35 000 €**	**+ 30 331 €**
Coûts d'intrants et d'équipements		**+ 36 000 €**	**+ 14 490 €**	**+ 13 403 €**	**0 €**	**0 €**	**+ 11 573 €**	**+ 8 530 €**
Marge contributive		**- 49 312 €**	**+ 8 500 €**	**+ 1 938 €**	**0 €**	**0 €**	**- 11 394 €**	**- 22 711 €**
Temps de résolution			*7200 sec 9.7% MILP*	*689 sec Optimal*	*1.9 sec Optimal*	*< 0.1 sec Optimal*	*12.8 sec Optimal*	*0.8 sec Optimal*

TABLE 2.3 – *Compte de résultat partiel de la ferme étudiée et des solutions du programme linéaire mixte, sachant que le modèle n'impose pas de satisfaire la demande des clients.*

L'analyse des solutions obtenues avec différents pas de temps aide à comprendre l'impact de la prise en compte de la périssabilité sur le dimensionnement d'une ferme maraîchère. Le modèle maximise le revenu de la ferme, assimilé ici à une marge contributive et constitué des revenus de la vente des produits moins les coûts de culture et les coûts de main d'œuvre. Avec un pas de temps de 1 jour (364 périodes par an), la solution donne des ordres de grandeur cohérents avec les résultats de la ferme, avec une marge contributive positive. Avec un pas de temps de 2 jours (182 périodes par an), les revenus des ventes et les coûts de culture sont plus faibles, moins d'ouvriers sont employés sur la ferme. La marge contributive reste positive. Avec des pas de temps plus longs (91 et 52 périodes par an), la meilleure solution est de ne rien produire, lorsqu'aucun emploi de main d'œuvre n'est imposé. Cela est possible car l'on n'impose pas de satisfaire la demande des clients dans le modèle (contraintes (2.32)). Lorsque l'on impose l'embauche d'au moins un ouvrier permanent, l'activité de la ferme génère des marges contributives négatives (colonnes de droite de la table 2.3) avec 91 ou 52 périodes par an.

Comme présenté sur le graphique de la figure 2.13, la fonction de perte pénalise plus fortement les quantités disponibles pour les longs pas de temps. Avec des pas de temps courts, le programme linéaire mixte permet de trouver un scénario de production rentable en exploitant les complémentarités entre itinéraires techniques, en vendant des produits périssables de différents âges, mimant ainsi le fonctionnement d'une ferme réelle. Avec des pas de temps plus longs, le programme perd la souplesse liée à la granularité fine. Ici, dans les cas à 91 et 52 périodes par an, la vente des produits ne permet pas de couvrir les coûts fixes, les coûts de main d'œuvre et les coûts de culture. Cette exemple montre l'intérêt de lier le dimensionnement stratégique et la planification tactique pour les systèmes de production de produits très périssables dans un secteur à faible marge.

La surface et la main d'œuvre dans les solutions. La structure stratégique de la solution peut varier grandement en fonction du pas de temps choisi, que ce soit la surface des parcelles (figure 2.14) ou la main d'œuvre employée (figure 2.15). La figure 2.14 présente la surface réellement cultivée sur la ferme (trait central) et l'intervalle de surfaces autorisé dans le modèle (aire bleutée), qui correspond aux bornes de surface des contraintes (2.6). Sur la figure, nous représentons les surfaces obtenues par le programme linéaire mixte pour les modalités à 364 périodes (-) et à 182 périodes (◇). Les deux modalités avec des pas de temps plus longs définissent toutes les surfaces des parcelles à zéro lorsque la main d'œuvre n'est pas imposée. La table sous le graphique inclut la surface des parcelles pour les modalités à 91 et 52 périodes lorsque l'embauche d'un salarié permanent est imposée.



Itinéraire technique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Produit	Fraise										Framboise		Tomate
Variétés	Clery	Joly	Elsanta	Clery	Joly	Candiss	Clery	Joly	Mara	Cirafine	Précoce	Remont.	Cerise
Surface min modèle	*140*	*100*	*100*	*140*	*100*	*100*	*140*	*100*	*370*	*370*	*950*	*950*	*530*
Surface sur la ferme	270	202	202	270	202	202	270	202	745	745	1890	1890	1050
Surface max modèle	*410*	*300*	*300*	*410*	*300*	*300*	*410*	*300*	*1120*	*1120*	*2840*	*2840*	*1580*
Surface solut° mod. 364p.	**410**	**300**	**0**	**410**	**0**	**300**	**410**	**0**	**1120**	**1120**	**2840**	**1160**	**1196**
Surface solut° mod. 182p.	**410**	**0**	**0**	**410**	**0**	**300**	**410**	**300**	**744**	**966**	**2840**	**950**	**1370**
Surface solut° mod. 91p. MOI	*410*	*300*	*0*	*410*	*300*	*300*	*410*	*300*	*0*	*859*	*1769*	*0*	*1580*
Surface solut° mod. 52p. MOI	**410**	**300**	**0**	**140**	**280**	**300**	**410**	**300**	**0**	**0**	**950**	**0**	**1580**

FIGURE 2.14 – *Surface des parcelles et semaines de plantation pour la ferme versus celles du programme linéaire mixte (MOI = 1 ouvrier permanent imposé)*

Le programme sélectionne des solutions qui mettent en œuvre moins d'itinéraires techniques (10 itinéraires) que dans la ferme (13 itinéraires). Le programme minimise de cette façon les coûts fixes liés au démarrage d'un itinéraire technique ; à l'inverse, le maraîcher mise sur une plus large gamme de variétés comme une stratégie de limitation des risques (voir section 2.2.1).

Pour la solution à 364-périodes, la surface associée aux itinéraires techniques 3, 5 et 8 est fixée à zéro : ces itinéraires ne sont pas sélectionnés car aucune solution plus profitable n'a pu être trouvée par le programme, compte tenu des contraintes sur la gamme de surface. Les itinéraires techniques 1, 6 et 7 sont sélectionnés à leur surface maximale dans les quatre modalités présentées dans la table : leur combinaison est toujours la plus profitable dans cette instance, quel que soit le pas de temps. Les autres itinéraires techniques ne sont sélectionnés que pour certaines modalités et leur surface dépend du pas de temps. Leur sélection par le programme ne dépend pas de leur valeur absolue, mais de la façon dont ils peuvent se combiner aux autres itinéraires techniques pour produire au moment où il y a une demande à satisfaire et de la main d'œuvre de cueille disponible. Les fonctions de pertes, dont les profils dépendent du pas de temps, influent sur la combinaison des itinéraires techniques et sur les surfaces qui leur sont affectées. Les solutions exploitent la possibilité de décaler les dates de début pour lisser les pics de production et de main d'œuvre, si bien que peu de temps de travail est consacré à la récolte des produits perdus (figure 2.15).

La figure 2.15 présente les profils d'ouvriers agricoles définis dans les instances, ainsi que la comparaison de la main d'oeuvre présente sur la ferme et celle des solutions du programme linéaire mixte. Sur *Les Fermes en Villes*, un permanent est employé et travaille 6 jours par semaine en saison. Ce profil est sélectionné dans les modalités à 364 et 182 périodes par an. A l'inverse, la sélection des profils de saisonniers et d'intérimaires est très différente entre la ferme et les solutions du modèles. Le graphique central représente les heures de travail disponible au cours de l'année, tous profils de main d'œuvre cumulés. La forme de la main d'œuvre totale employée dans les solutions du programme se rapproche de celle constatée sur la ferme malgré les différences de profils la constituant. Toutefois, les besoins de main d'œuvre sont sous-estimés par le programme par rapport à la réalité. Les données gagneront à être précisées par de nouveaux relevés de terrain pour une plus grande fiabilité sur la durée des tâches et la productivité des travailleurs. Enfin, moins de main d'œuvre est employée dans la modalité à 182 périodes que dans celle à 364 périodes, en cohérence avec une activité plus faible (table 2.3).

Catégorie d'ouvrier		Durée	Nombre moyen d'heures de travail par jour							Effectif	*Effectif*	Solutions modèle	
Nom	id	du contrat	Lun.	Mar.	Mer.	Jeu.	Ven.	Sam.	Dim.	ferme	*max*	Mod. 364p.	Mod. 182p.
Ouvrier	1	/	8	8	8	8	7	0	0		*1*		
permanent	2	/	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	0	1	*1*	1	1
Ouvrier saisonnier à temps plein	3	5 mois	7	7	7	7	7	0	0		*3*		
	4	4 mois	7	7	7	7	7	0	0		*3*		
	5	2 mois	7	7	7	7	7	0	0		*3*	1	1
	6	5 mois	6	6	6	6	6	5	0	1	*3*		
	7	4 mois	6	6	6	6	6	5	0	2	*3*	3	2
	8	2 mois	6	6	6	6	6	5	0	2	*3*		
Saisonnier mi-tps	9	3 mois	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	0	0	1	*1*		
Interimaire	10		7	7	7	7	7	0	0	occasionnel	*1*		

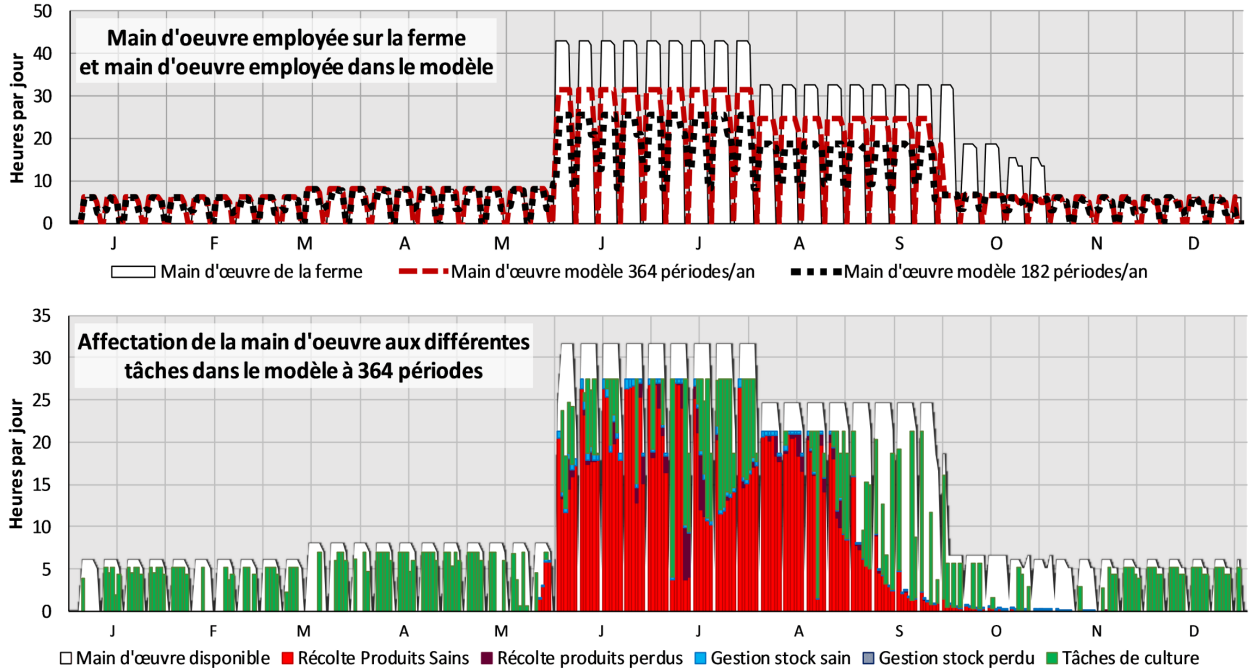


FIGURE 2.15 – *Main d'œuvre employée dans la ferme et dans les solutions du programme linéaire ; affectation de cette main d'œuvre aux différentes tâches agricoles*

Sur le dernier graphe de la figure 2.15 sont représentés les différentes activités qui occupent les ouvriers pour la solution du programme à 364 périodes par an. La récolte, la livraison et les tâches de culture n'occupent pas tout le temps de travail disponible. En effet, un temps de management mg_t est fixé à 15% du temps dédié aux activités agricoles (constraintes (2.12) et (2.13)).

Après discussion de ces résultats avec le chef de culture des *Fermes en Villes*, nous tirons les conclusions suivantes. Le critère efficacité des différents profils d'ouvriers e_w (contraintes (2.11)) doit être ajustée pour tenir compte du grand écart de productivité entre des travailleurs permanents expérimentés et des saisonniers inexpérimentés. Par ailleurs, la durée $D_{k,j}$ et le coût $C_{k,j}$ des tâches de culture gagnera à être relevée plus finement lors de futurs relevés pour obtenir des solutions pertinentes à partir du modèle.

La prise en compte des services

Dans ce travail, nous avons pour objectif de modéliser des fermes maraîchères diversifiées en productions, mais aussi en activités para-agricoles. Ainsi, des fermes peuvent développer une offre de services pédagogiques, logistiques ou d'accueil pour valoriser au mieux les ressources à leur disposition. Les travaux présentés dans ce manuscrit se focalisent sur les productions agricoles. Cependant, nous avons voulu profiter de la diversité des activités des *Fermes en Villes* pour tester le modèle sur une activité de services.

Sur le site des *Fermes en Villes*, une activité de location de jardins à des familles complète l'activité de production du maraîcher. Sur la même année 2015, une quarantaine jardins de 50 m^2 en grands bacs surélevés ont été construits et loués. L'animateur de ces jardins a noté son temps de travail pour cette année. Il se décompose en une activité administrative de routine à raison de 3h de travail par semaine environ, à laquelle s'ajoutent 3 heures de cours de maraîchage offerts un samedi par mois aux jardiniers locataires.

FIGURE 2.16 – *Les jardins hors-sol en bac proposés à la location à des familles aux Fermes en Villes*

La structure des itinéraires techniques de cultures permet aussi de modéliser les services. Par exemple, l'offre de location de jardins intègre des cours de jardinage mensuels et des échanges réguliers avec les locataires. Ces cours peuvent être modélisés comme des tâches de culture, avec des temps et coûts fixes et variables, dans une gamme de surface prédéfinie pour cette activité. L'encaissement des loyers tous les trimestres peut être modélisé via une courbe de production proportionnelle à la surface ; obtenir ces loyers nécessite un temps de relance et de suivi, assimilés aux temps de récolte.

La question de l'intégration des services dans le modèle a besoin d'être approfondie. Un travail est en cours pour collecter les données nécessaires et définir les contraintes additionnelles liées aux services. Dans la plupart des cas, les activités de services génèrent des marges plus importantes que les activités de production. Nous devons définir des indicateurs pertinents, comme le pourcentage de surface ou de temps de travail affecté aux services ou le chiffre d'affaires maximal issu des services, pour obtenir des solutions qui reflètent l'équilibre entre production et services sur les fermes.

Conclusion sur le cas concret

Nous considérons que le modèle de programme linéaire mixte répond aux enjeux pour lequel il a été développé. Il fournit des solutions pertinentes et cohérentes avec la réalité observée sur un cas

concret, pour les structures des solutions comme pour les résultats économiques. La main d'œuvre représente un coût important pour une ferme maraîchère et notre modèle peut aider à obtenir un bon dimensionnement de la main d'œuvre nécessaire sur une saison en fonction des productions envisagées. Cependant, les données et les paramètres du modèle doivent être ajustés sur d'autres cas réels pour obtenir un outil fiable d'évaluation de scénarios de fermes urbaines. De plus, les temps de résolution restent longs pour le pas de temps le plus adapté au problème (364 périodes d'un jour). Ce cas d'étude isolé ne permet pas d'analyser les performances de résolution du programme et, dans ce but, nous pratiquons une série de tests sur des instances artificielles de plus grande taille.

5.2 Analyse des performances du programme linéaire mixte sur des instances artificielles

Données

Nous avons lancé une série de tests numériques pour évaluer les performances dans la résolution du programme linéaire mixte. Nous avons généré différents scénarios artificiels basés sur des données technico-économiques agricoles réelles. Les itinéraires techniques sont issus du rapport de Africano *et al.* (2010), qui décrit différents systèmes de culture rencontrés dans le Sud-Ouest de la France. Si ce rapport ne propose pas de données économiques à l'échelle de la ferme, il offre néanmoins une base détaillée à l'échelle de la parcelle, avec des itinéraires techniques pour cultiver 10 produits dans des conditions de culture variées (table 2.4). Les prix des produits proviennent de l'Observatoire National des marchés (FranceAgriMer, 2017) pour la région concernée. Les profils de main d'œuvre sont définis comme présenté plus haut.

Produit	Nombre d'itinéraires techniques				
	PC	T	DPG	DPGC	Total
Artichaud	4				4
Bettes		2			2
Céleri	2	2			4
Concombre		2	6		8
Laitue	18	8	6		32
Melon		4			4
Pomme de terre	4	2			6
Tomate		4		2	6
Tomate Grappe				4	4
Scarole	10	2			12

TABLE 2.4 – *Nombre d'itinéraires techniques pour les différents produits de l'instance, selon les infrastructures considérées : plein champ (PC), tunnel (T), serre double paroi gonflable froide (DPG) ou chauffée (DPGC)*

Différents scénarios sont définis à partir de cette base d'itinéraires techniques. Les gammes de surfaces et l'effectif maximal de main d'œuvre sont inspirés des situations que l'on peut rencontrer dans les fermes maraîchères diversifiées en zone péri-urbaine. En combinant différentes valeurs des paramètres présentés ci-après, nous générons 120 instances réalistes.

— 1 ensemble de produits et d'itinéraires techniques (table 2.4),
— 5 surfaces de ferme A_{tot} : 10 000, 20 000, 30 000, 40 000 or 50 000 m^2,

— 2 scénarios de main d'œuvre : main d'œuvre abondante (au maximum 5 ouvriers employables pour chaque catégorie) ou main d'œuvre plus limitée (au maximum 3 permanents et 3 saisonniers),
— 3 profils de demande au cours de l'année : 1. constant toute l'année, 2. demande plus forte du printemps à l'automne ou 3. demande plus forte au printemps et à l'automne (figure 2.17),
— 2 amplitudes de demande : 200 kg ou 400 kg de chaque produit demandés par semaine, en moyenne sur l'année,
— 2 profils d'évolution des prix au cours de l'année : 1. constants toutes l'année ou 2. prix plus faible pendant la pleine saison (figure 2.17).

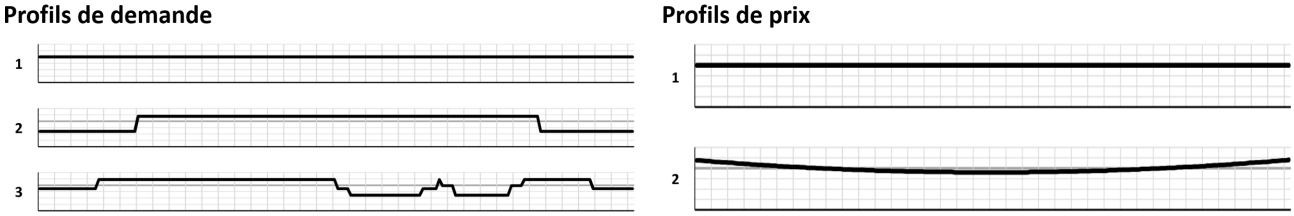


FIGURE 2.17 – *Scénarios d'évolution sur l'année des demandes et des prix de l'instance*

Le programme linéaire mixte est résolu avec le même environnement logiciel et matériel de calcul que pour le cas réel présenté plus haut. L'horizon de planification s'étend sur une année divisée en différents pas de temps pour évaluer la performance de la modélisation du caractère périssable des produits : 26 périodes de deux semaines, 52 périodes d'une semaine et 182 périodes de 2 jours. Les trois pas de temps testés ici diffèrent des pas de temps utilisés pour le cas réels ; nous avons privilégié des pas de temps plus longs pour obtenir des solutions sur ces instances artificielles de plus grande taille que les instances réelles. Nous fixons une limite de temps de résolution à 20 minutes pour les tests à 26 ou 52 périodes et 120 minutes pour les tests à 182 périodes. Les instances à 364 périodes par an dépassaient les capacités du système, du fait de leur grande taille.

Analyse des performances

Combiner des décisions tactiques et stratégiques dans un même modèle pose la question du choix du pas de temps. Quel pas de temps permet le meilleur compromis entre pertinence de la solution trouvée et rapidité de calcul pour répondre aux attentes des utilisateurs ciblés ? Comme présenté dans les figures 2.14 et 2.15, la structure stratégique de la solution, c'est-à-dire la surface allouée à chaque itinéraire technique et la main d'œuvre employée, dépend fortement du pas de temps choisi. Nous privilégions des pas de temps courts Dans le contexte de l'étude. Par exemple, la livraison à jour fixe d'une Amap [5] entraîne un pic de travail ponctuel qui peut entrer en concurrence avec la récolte des produits périssables.

La figure 2.18 présente les résultats obtenus par le programme linéaire mixte pour 120 instances et 3 pas de temps. Pour toutes les instances à 182 périodes, la limite de temps de calcul de 2 heures est atteinte avant que la solution optimale ne soit trouvée. Pour les instances à 52 périodes par an, le temps de calcul est 529 ± 275 secondes, contre 4 ± 2 secondes pour les instances à 26 périodes par an. Le modèle est très combinatoire et réduire le pas de temps (ou augmenter le nombre de périodes par an) accroît rapidement la taille du modèle et les temps de calcul. Nous souhaitons évaluer l'impact du choix du pas de temps sur les résultat du programme linéaire mixte (MILP).

5. Amap : association pour le maintien d'une agriculture paysanne, voir 4

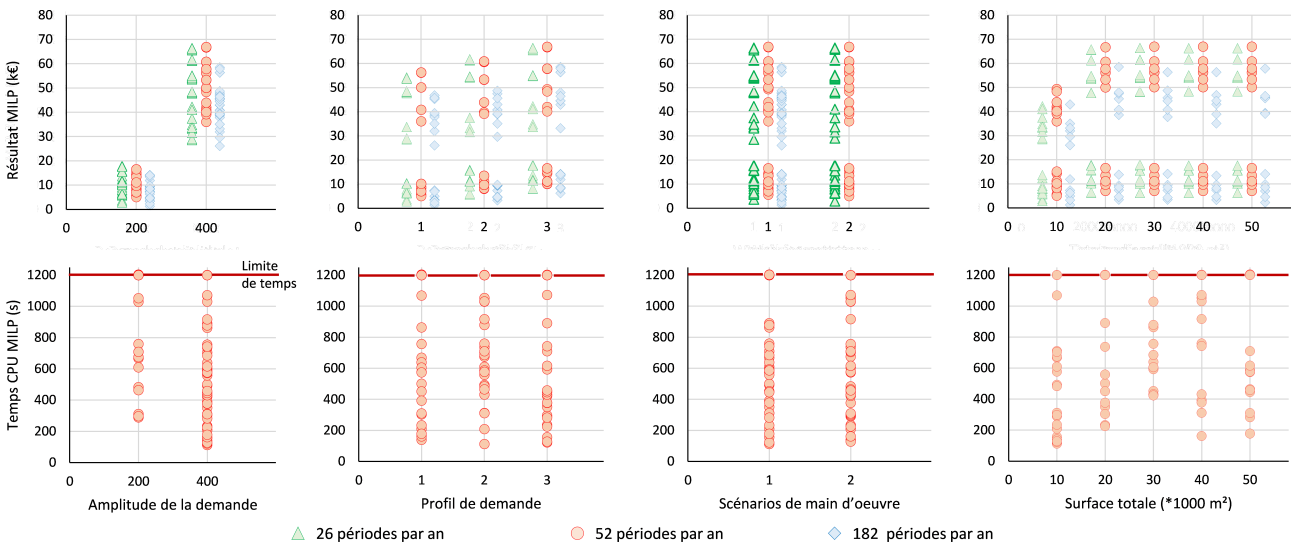


FIGURE 2.18 – *Distribution des objectifs atteints et des temps de résolution du modèle en programmation linéaire mixte (MILP) pour les 120 instances et les 3 pas de temps*

La première ligne de graphiques illustre la distribution des revenus économiques dans les solutions, selon quatre paramètres présentés plus haut. 43 instances sur 120 obtiennent pour 52 périodes par an une solution avec un meilleur revenu qu'avec 26 périodes par an (amélioration de $+13\% \pm 14\%$ sur ces instances). Pour 15 instances, passer à un pas de temps plus fin, de 26 à 52 périodes par an, dégrade le revenu des solutions, de $95\% \pm 6\%$. Au bout de plusieurs heures ce calcul, les instances avec 182 périodes sont encore loin d'atteindre la solution optimale, ce qui rend difficile la comparaison des résultats économiques à ce pas de temps fin.

Intéressons nous maintenant à l'impact des différents paramètres structurels des instances. Lorsque la surface de production est moins limitante, le revenu est logiquement plus important lorsque les quantités demandées sont plus importantes. Passer de 200 kg à 400 kg de chaque produit demandés par semaine permet une augmentation moyenne du revenu de $413\% \pm 126\%$. Le profil de la demande influe sur le revenu généré. Le profil 1, correspondant à une demande linéaire au cours de l'année, n'est pas favorable pour les productions saisonnées étudiées ici. La majeure partie des volumes étant produite en été et automne, une demande linéaire est associée à des demandes non satisfaites hors saison et des invendus en saison. A l'inverse, les profils de demande 2 et 3 correspondent à des demandes plus forte en saison de production, qui permettent de mieux valoriser la production et la main d'œuvre.

Dans ces instances, le changement de scénario de main d'œuvre impacte peu les solutions. Pour les trois pas de temps étudiés, le rapport entre les résultats du MILP avec les scénarios de main d'œuvre 1 et 2 est $100\% \pm 3\%$. Toutefois, les temps de calcul sont très différents entre les 2 scénarios pour chaque instance, du fait des multiples combinaisons de variables liées au choix de la main d'œuvre. Enfin, dans le dernier graphe de revenu, nous constatons que la capacité de production, liée à la surface disponible, a moins d'influence sur le résultat que des paramètres comme l'amplitude de la demande. Pour chaque scénario de surface, nous distinguons 2 groupes d'instances distincts correspondant aux amplitudes de demande du premier graphique. Seul le scénario 1, la plus petite surface, est significativement différent des autres scénarios (inférieur de $38\% \pm 8\%$ aux autres scénarios) : la surface de production ne permet pas de répondre au potentiel de demande.

Ces résultats mettent en évidence l'impact du pas de temps choisi sur les temps de calcul et les décisions prises pour des instances de grande taille. Avec la configuration de calcul utilisée

et compte-tenu de la taille des instances, nous n'avons pas pu étudier en profondeur les résultats pour les pas de temps les plus fins, 182 et 364 périodes. Pour les instances à 26 et 52 périodes, les résultats présentés permettent de mesurer l'influence des paramètres structurels définis dans les instances sur les résultats et les temps de calcul du programme linéaire mixte. Les caractéristiques de la demande en produits sont dans notre exemple le facteur le plus discriminant. En outre, dans ce modèle très combinatoire, des solutions peuvent avoir des résultats économiques proches et une structure stratégique très différente en termes d'itinéraires sélectionnés, de surfaces ou de profils de main d'œuvre. Nous devons approfondir l'analyse des performances du programme sur des cas concrets pour interpréter conjointement les temps de calcul et la qualité de la solution en comparaison des données de terrain.

5.3 Quels apports de ce modèle pour les chefs d'exploitation agricole

Notre modèle peut aider les producteurs à visualiser et lier les nombreuses variables qu'ils ont à considérer pour développer un nouveau projet agricole. La main d'œuvre est un coût majeur sur une ferme maraîchère et notre modèle peut aider à dimensionner au plus juste la main d'œuvre étant données les productions pratiquées. Bien que les données et paramètres du modèle aient besoin d'être ajustés par de nouvelles études de fermes, nous pouvons tirer plusieurs conclusions quant à l'apport de nos travaux pour les exploitants.

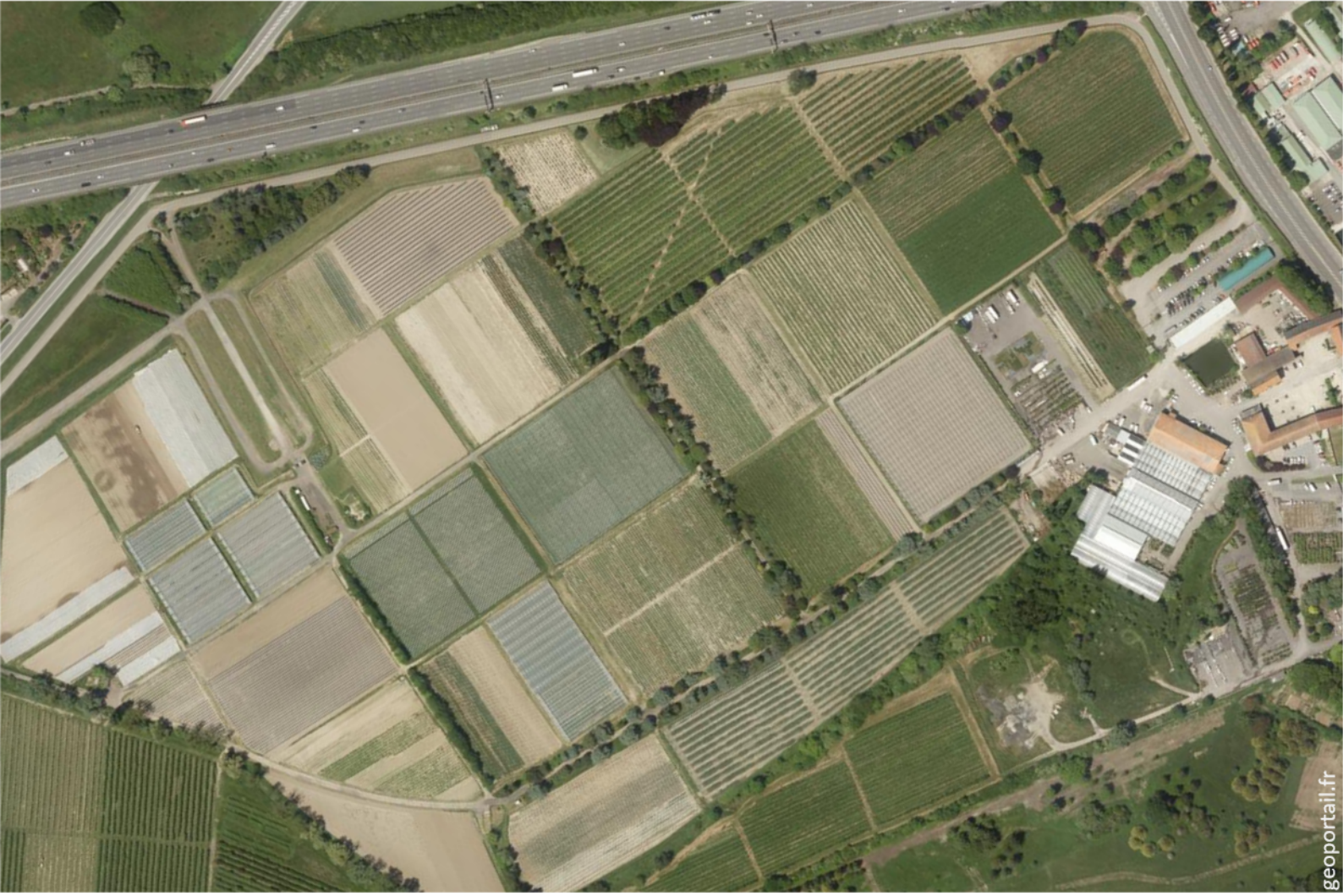
Le modèle permet d'obtenir des ordres de grandeur pertinents pour les résultats économiques comme les ventes, les coûts de main d'oeuvre ou les coûts de la mise en culture d'une parcelle. Il informe aussi sur les dynamiques annuelles de l'activité agricole, à travers l'estimation de la production et de la trésorerie au cours de l'année. Grâce à ces données, l'exploitant peut vérifier que son plan de production est cohérent avec les circuits de distribution envisager ou estimer son besoin en fond de roulement.

La spécificité de notre modèle est de prendre en compte la périssabilité dans le dimensionnement d'une ferme maraîchère. L'exploitant peut simuler l'impact d'un changement d'itinéraire technique ou de l'introduction d'une nouvelle culture. Les autres productions en sont-elles impactées, dans quelle mesure ? Ce changement entraîne-t-il une augmentation du besoin de main d'œuvre ? Quel itinéraire technique choisir pour un produit donné afin d'utiliser la main d'œuvre présente de manière efficiente ? Nous nous focalisons sur la combinaison des différents itinéraires techniques, notamment lors des pics de production. Les longs temps de calcul et la consommation de mémoire du programme actuel peuvent limiter l'utilisation du modèle avec des pas de temps cours, bien qu'ils soient les plus adaptés au dimensionnement de fermes maraîchères.

6 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle stratégique et tactique développé en programmation linéaire mixte (MILP) pour accompagner la conception de systèmes de production agricole urbains spécialisés en fruits et légumes frais. Ce modèle permet de combiner différentes méthodes de productions pour plusieurs produits, en prenant en compte la périssabilité avec des pas de temps courts, afin d'obtenir une simulation réaliste du fonctionnement d'une ferme maraîchère. Notre modèle tire son originalité du fait qu'il intègre des décisions stratégiques et tactiques pour dimensionner des systèmes de productions agricoles multitechniques et multiproduits, avec produits périssables.

Nous avons trouvé des solutions pertinentes sur un cas d'étude réel, la ferme urbaine expérimentale exploitée par les *Fermes de Gally*. Ce cas d'étude démontre l'intérêt de prendre en compte la périssabilité avec des pas de temps courts pour obtenir le dimensionnement stratégique d'une ferme produisant des denrées rapidement périssables. Ce cas illustre bien l'utilisation future du modèle, comme outil de simulation de différents scénarios de production construits avec les producteurs et leurs conseillers agricoles. Pour des instances de grande taille (nombreux itinéraires techniques et pas de temps courts), obtenir la solution optimale du problème nécessite des temps de résolution de plusieurs heures, malgré les prétraitements que nous proposons pour améliorer le processus. Les suites de ce travail seront d'étudier des techniques de relaxation ou de décomposition afin d'obtenir des méthodes de résolution approchée de bonne qualité mais avec des temps de résolution plus rapide, notamment lorsque l'optimalité des solutions n'est pas recherchée.



3 Un modèle de dimensionnement stratégique des fermes maraîchères

Résumé du chapitre

Nous présentons dans ce chapitre un modèle d'aide au dimensionnement et à la planification stratégiques des investissements matériels et humains pour maximiser le revenu agricole pluri-annuel d'une ferme maraîchère en réponse à des demandes connues de clients. Ce modèle en programmation linéaire mixte intègre les coûts et les temps liés à l'installation des infrastructures productives, telles que les serres, les tunnels ou les réseaux d'irrigation. Il intègre aussi la gestion des stocks périssables ainsi qu'un délai minimal avant le retour d'une plante de même famille botanique sur une parcelle pour prendre en compte les contraintes agronomiques. De la sorte, notre modèle permet de combiner des itinéraires techniques en pleine terre et des itinéraires techniques hors-sol sur une même exploitation. Nous testons sur le cas concret d'une exploitation horticole que les Fermes de Gally souhaitent reconvertir en exploitation maraîchère. Malgré des données d'entrée incomplètes dans ce cas, notamment les itinéraires techniques, nous obtenons des solutions réalistes qui traduisent bien le fonctionnement d'une ferme diversifiée.
Ce travail a fait l'objet d'une communication au cours du Congrès de la ROADEF à Compiègne en 2016 (Brulard *et al.*, 2016a).

Contexte

Alexis et Benjamin, nos maraîchers du chapitre précédent, ont réussi une première année satisfaisante chacun dans leur ferme. Forts de leur première expérience, ils souhaitent définir une stratégie d'exploitation à plus long terme. Ils s'intéressent donc à la succession des cultures dans le temps et à l'étalement des investissements dans les années à venir. Les successions de cultures sont très étudiées d'un point de vue agronomique, du fait des interactions entre une culture et la culture suivante qui influent positivement ou négativement sur le rendement, sur la propagation de maladies ou sur la structure du sol. Benjamin s'intéresse à ces interactions entre plantes en production en pleine terre, mais Alexis n'est pas concerné avec son choix de culture hors-sol. Ce qui unie ici nos maraîchers, c'est l'impact des successions de culture sur la gestion de la trésorerie et du temps de main d'œuvre. Différents itinéraires techniques sont possibles pour un même produit et leur choix et leur combinaison avec les itinéraires techniques des autres produits peuvent aboutir à des pics de travail ou des creux de trésorerie que les deux fermes ne peuvent pas se permettre.

Nous présentons dans ce chapitre un modèle stratégique de dimensionnement des investissements productifs tels que les serres, l'irrigation, les équipements logistiques. Il s'appuie sur la définition d'une succession d'itinéraires techniques, dépendant des investissements, sur plusieurs années, pour cibler des marchés identifiés par le producteur. Nous prenons en compte les coûts et les temps liés au changement de culture. Nous intégrons un délai minimal avant le retour d'une plante de même famille botanique sur une parcelle. De ce fait, le modèle proposé peut s'appliquer à la culture de plein champ (avec les contraintes botaniques) comme à la culture hors-sol (avec la prise en compte des temps et coûts de changement). Sur le plan de la résolution, pour maintenir une consommation de mémoire et des temps de calcul compatibles avec les enjeux des acteurs de terrain, nous choisissons de séparer en deux modèles distincts la succession pluri-annuelle de cultures, traitée dans ce chapitre, de la planification annuelle présenté au chapitre 2. La prise en compte fine de la périssabilité du modèle de planification tactique alourdirait le modèle de succession des cultures. Nous proposons au chapitre 5 une approche de connexion de ces deux modèles pour répondre à des problématiques concrètes.

1 Description du problème de dimensionnement stratégique

Dans ce problème, nous nous intéressons toujours à une ferme maraîchère diversifiée, produisant et vendant des produits périssables, avec des ressources limitées en capital, main d'œuvre et surface. Nous cherchons à accompagner les choix stratégiques d'investissement du producteur, en fonction de ses objectifs de production et de commercialisation.

Les données du problème sont décrites ci-après et représentées sur la figure 3.2.

— L'*état initial de la ferme* : taille des parcelles et aménagements déjà présents sur les parcelles (serres, tunnels, plein-air, irrigation).

— Un *ensemble d'itinéraires techniques* qui peuvent être mis en œuvre dans le contexte de la ferme. L'itinéraire technique lie un rendement en produit p aux ressources nécessaires à sa réalisation : infrastructures, équipements, capital, main d'œuvre, surface. Plusieurs itinéraires techniques sont définis pour chaque produit selon les ressources nécessaires. La

	Modèle de planification tactique	Modèle de dimensionnement stratégique	Modèle de sélection des clients
PARAMETRES DU MODELE			
Horizon temporel	1 an	2 à *n* ans	1 an
Pas de temps	1 jour à 1 semaine	1 semaine à 2 mois	1 jour à 1 semaine
Achat-revente auprès d'autres fermes	*Non considéré*	*Non considéré*	Défini par le modèle
Gestion de la périssabilité	Flux à 2 niveaux : stock au champ et en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide
Caractéristique de la demande	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Structure de demande spécifique à chaque client
DECISIONS A PRENDRE			
Sélection des produits cultivés	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Donnée d'entrée
Sélection des méthodes de production	Définie par le modèle	Définie par le modèle	*Non considérée*
Surface des parcelles	Définie par le modèle	Donnée d'entrée	*Non considérée*
Succession de cultures	*Non considérée*	Définie par le modèle	*Non considérée*
Sélection des profils de main d'œuvre	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Main d'œuvre fixe, intérim possible
Sélection des clients	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Obligation de répondre à l'intégralité de la commande des clients sélectionnés.

FIGURE 3.1 – *Positionnement du problème traité dans ce chapitre*

définition et la modélisation des itinéraires techniques est présentée dans la section 2.3 du chapitre 2.

— Les *coûts et temps de changement* d'une culture à l'autre. La succession de deux cultures peut nécessiter des investissements (nettoyage de la parcelle, installation de l'irrigation, changement de système de culture). Ces investissements peuvent intervenir lorsque la trésorerie de la ferme le permet. Des temps de changement sont également pris en compte, car le changement d'équipement d'une parcelle peut entrer en concurrence de tâches de culture, de récolte ou de commercialisation sur la ferme. On dira que ces coûts et temps sont séquence-dépendants, dans la mesure où ils dépendent de la séquence, de l'enchaînement des infrastructures et des cultures sur la parcelle.

— Un *rendement donné* : en culture en pleine terre, le rendement d'une plante peut varier selon les cultures précédemment cultivées sur la parcelle. D'une part, les plantes sont complémentaires ou concurrentes pour l'utilisation des différents nutriments du sol. D'autre part, le choix de la succession de culture influence la dynamique de développement des maladies et des ravageurs des plantes. Dans notre modèle, nous ne prenons pas en compte de rendement séquence-dépendant. Le rendement est donné pour un itinéraire technique.

— La *demande des clients* : le dimensionnement stratégique des investissements de l'exploitation est corrélé aux marchés ciblés par le producteur. Vendre à la grande distribution ou en vente directe n'entraîne pas la même structure d'exploitation. La demande des clients est supposée connue en volumes et en prix sur tout l'horizon de planification.

— Les différents *profils de main d'œuvre* qui peuvent être employés sur l'exploitation (ouvriers permanents, saisonniers, intérim). Ces profils sont présentés à la section 2.4 du chapitre 2.

L'objectif du producteur est la maximisation de son revenu économique sur l'horizon de planification. La figure 3.3 représente les principales décisions attendues : l'affectation des investissements et des itinéraires techniques sur les parcelles. Les questions auxquelles nous souhaitons répondre avec ce modèle sont les suivantes.

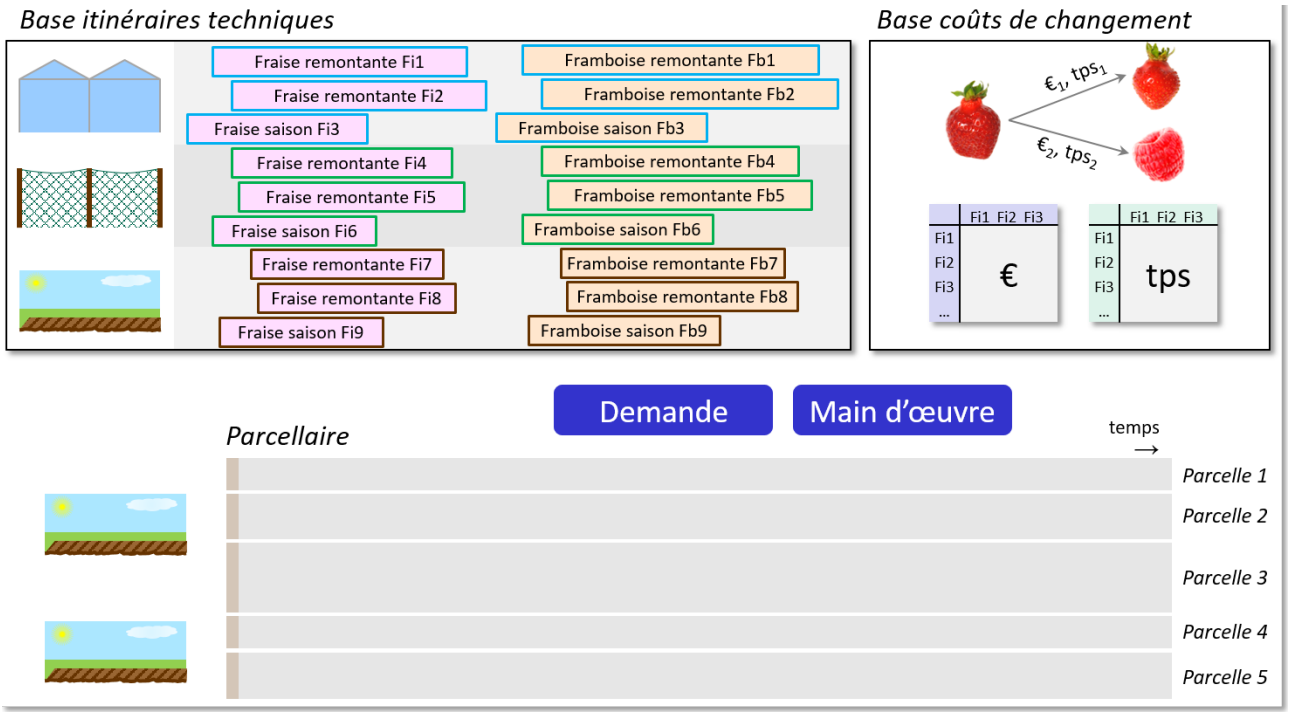


FIGURE 3.2 – *Les données du problème de dimensionnement stratégique*

— Quelle infrastructure i sélectionner sur chaque parcelle ? Sur l'exemple de la figure 3.3, trois parcelles sont couvertes d'une serre et deux parcelles sont laissées en culture de plein air. Le changement d'infrastructure peut intervenir à toute période de l'horizon de planification.
— Quel itinéraire technique k, produisant le produit p, démarrer à la période t sur la parcelle f pour répondre à la demande, en tenant compte de la main d'œuvre disponible, des infrastructures sur les parcelles et des coûts et temps de changement entre itinéraires techniques ?
— Quelle est la main d'œuvre nécessaire et quels profils d'ouvriers agricoles employer pour assurer la production maraîchère, la commercialisation des produits et les travaux de changement d'une culture à l'autre ?

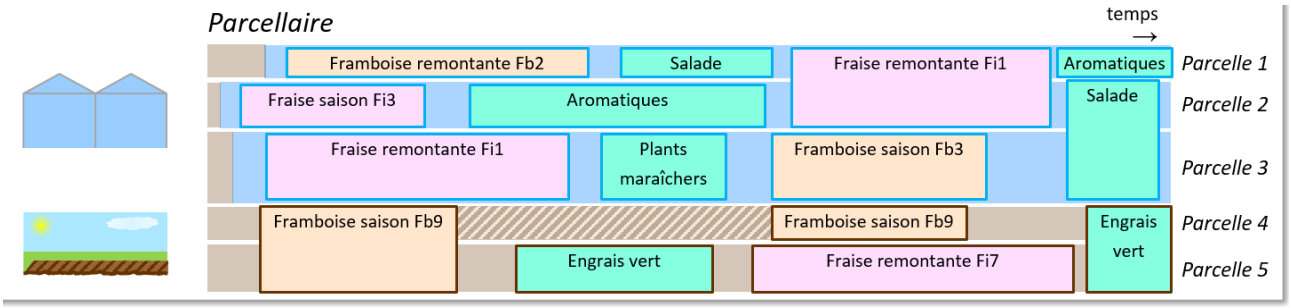


FIGURE 3.3 – *Représentation des décisions attendues en sortie du modèle stratégique*

2 Un état de l'art sur les rotations de cultures et les changements de lignes de production

La définition de successions de cultures efficientes et leur évaluation sur des critères économiques, agronomiques ou environnementaux occupent une place importante dans la recherche agricole. Ces problèmes ont leurs équivalents dans la Recherche Opérationnelle appliquée à l'industrie ou à la finance.

2.1 La définition de nouvelles successions de culture

La définition de successions et de rotations de cultures est un des piliers de l'agriculture durable. Les rotations de culture désignent des séquences de cultures récurrentes sur une parcelle, le terme cultures incluant des cultures qui seront récoltées pour être autoconsommées ou vendues, ainsi que des engrais verts ou des périodes de friches (Schönhart *et al.*, 2011). Le modèle agroindustriel généralisé dans de nombreux pays repose sur des monocultures ou des rotations de courtes durées (colza/blé/orge par exemple dans les plaines céréalières françaises) qui nécessitent une utilisation intensive de capital, de produits phytosanitaires, d'engrais de synthèse et de ressources non renouvelables (Dos Santos *et al.*, 2010). En France, l'utilisation massive d'engrais azotés - premier pays consommateur en Europe - entraîne des pollutions de l'eau, une érosion de la biodiversité et de fortes émissions de gaz à effet de serre (Nemecek *et al.*, 2015). Des rotations plus longues et plus diversifiées, incluant notamment des légumineuses qui fixent l'azote de l'air, permettent de créer des systèmes de production plus durables (Vereijken, 1997). Selon Nemecek *et al.* (2015), bien concevoir des rotations nécessite des compétences qui ont été en partie perdues avec la spécialisation des systèmes agricoles agroindustriels. Pour certains systèmes de production à rendement différé de plusieurs années, comme en arboriculture, le producteur doit pouvoir disposer de toutes les informations techniques et économiques pour anticiper les variétés à planter (Willis et Hanlon, 1976).

L'objectif des modèles présentés ci-après est l'obtention d'un plan de rotation, une affectation des cultures aux différentes parcelles au cours du temps. En 1986, El-Nazer et McCarl proposent un modèle en programmation linéaire pour définir une rotation à profit maximal en considérant trois cultures annuelles précédentes. En considérant que le rendement d'une culture peut être calculé en connaissant les cultures précédentes sur la parcelles, ils n'ont pas besoin de recourir à un ensemble de successions prédéfinies. Ils valident leur modèle sur une ferme américaine produisant de la pomme de terme, du maïs, du blé et de la luzerne. Dury *et al.* (2012) ont réalisé une revue de 120 articles traitant des décisions d'assolement et de rotations de culture et en tirent les conclusions suivantes. Dans les articles étudiés, les décisions concernant les plans de culture sont le plus souvent traitées de façon statique, la décision étant prise en une fois pour toute la période de planification et un seul critère monétaire est considéré comme objectif du problème. Par ailleurs, lorsqu'elles sont prises en compte, les incertitudes sont traitées de façon statique, même lorsque des informations sont disponibles sur leur possible évolution. Dury *et al.* (2012) plaident pour des outils d'aide à la décision plus dynamiques qui incluraient les processus de décision des producteurs. Le modèle de Costa *et al.* (2011) définit la surface à affecter à différentes rotations de cultures prédéfinies, en incluant une fonction de perte liée au stockage de produits périssables. Dans leurs travaux, Dos Santos *et al.* (2010, 2011) traitent du *Sustainable Vegetable Crop Supply Problem*, qui consiste à déterminer la meilleure répartition des cultures sur des parcelles hétérogènes pour atteindre une demande donnée en maximisant le volume de production ou le revenu. Les auteurs s'intéressent aux cultures maraîchères, en prenant

en compte la grande diversité de produits et les différentes saisons et durées de production. Leur modèle en programmation linéaire mixte intègre des contraintes écologiques : interdiction de cultiver deux plantes de la même famille à la suite sur une même parcelle ou en même temps sur des parcelles voisines, recours régulier aux engrais verts et à la friche. Ils présentent un algorithme de génération de colonnes pour résoudre leur problème.

Klein Haneveld et Stegeman (2005) définissent des successions de cultures infaisables (non souhaitable sur les différentes parcelles) comme données d'entrée de leur modèle en programmation linéaire. Les principales variables de décisions du problème sont les aires de parcelles sur lesquelles des successions de m cultures sont mises en œuvre. Detlefsen et Jensen (2007) s'inspirent de ces travaux et appliquent une modélisation de réseau de flots. Les surfaces totales prévues pour chaque culture chaque année sont données, ce qui permet de construire un réseau dont les sommets sont les offres et les demandes en produits et les arcs sont les marges brutes espérées de chaque succession de culture. Le modèle revient à chercher un flot de valeur maximale qui satisfasse toutes les demandes, en tenant compte d'un ou deux précédents culturaux. Salassi *et al.* (2013) proposent aussi une formulation en réseau pour définir les rotations de cultures à laquelle ils intègrent les risques de variations du revenu selon les incertitudes sur les rendements et les prix de vente. Toujours dans la classe des *Crop Rotation Planning Problems*, Alfandari *et al.* (2015) adoptent une approche originale en cherchant une rotation de cultures annuelles (riz, haricots) qui minimise la surface cultivée nécessaire à fournir une quantité donnée de produits. Leur travail s'inscrit dans un contexte d'agriculture vivrière à Madagascar où il est nécessaire de laisser des surfaces en friche plusieurs années pour reproduire la fertilité des sols. Ils définissent les états possibles des parcelles, en fonction des durées maximales de culture et de friches préconisées et valident leur modèle sur des instances de 8 cultures, 12 saisons de cultures et 70 parcelles.

La conception d'un plan de culture sur plusieurs années se rapproche des problématiques de gestion de portefeuille dans le domaine de la finance. Il s'agit d'analyser quantitativement comment des investisseurs peuvent diversifier leur portefeuille pour minimiser les risques et maximiser les revenus sur plusieurs années. Radulescu *et al.* (2011) présentent les nombreux risques liés à la production agricole et les stratégies de diversification pour obtenir un système de production robuste. Dans leur article, les auteurs présentent un modèle multiobjectif, inspiré de la gestion de portefeuille financier,[2] visant à minimiser le risque environnemental (pollution notamment), maximiser le résultat économique attendu et minimiser le risque financier.

2.2 Les modèles d'évaluation multicritères des rotations de culture

Des modèles transdisciplinaires sont utilisés pour évaluer l'impact de politiques publiques, d'innovation ou du changement climatique sur de grands territoires. L'évolution de l'utilisation des surfaces agricoles est un résultat attendu de ces modèles et la modélisation des rotations peut aider à définir les scénarios d'affectation des surfaces. La génération de rotation n'a pas ici d'intérêt pour aider la décision du producteur, elle est le support d'une évaluation d'impact à grande échelle. Nemecek *et al.* (2015) évaluent la durabilité et l'éco-efficience de 64 rotations dans trois régions céréalières françaises, la Beauce, la Moselle et la Bourgogne. Ils appliquent l'analyse de cycle de vie aux rotations avec un focus spécifique sur le cycle de l'azote. Leur étude conclut sur l'intérêt d'inclure la culture d'une légumineuse, le pois, dans la rotation et de réduire les doses d'azote sur les céréales pour atteindre un nouvel équilibre. Aurbacher et Dabbert (2011) proposent une approche de simulation stochastique basée sur les chaînes de Markov pour définir la répartition spatiale et temporelle des cultures sur un territoire. Le modèle repose sur une matrice de précédence qui définit

l'intérêt relatif des successions de cultures deux à deux. Dans cet exemple encore, une seule saison de culture est considérée chaque année. Schönhart *et al.* (2011) poursuivent un objectif similaire avec leur modèle CropRota. En partant du pourcentage de différentes cultures sur un territoire, ils estiment la répartition spatiale et temporelle de plusieurs rotations classiques en maximisant la valeur agronomique des rotations ? Cette valeur intégre différents critères sur l'impact des différentes successions de culture sur le sol, les maladies ou la fertilisation.

ROTAT est un programme de génération systématique de rotations proposé par Dogliotti *et al.* (2003). Le programme ne réalise pas d'optimisation, mais réduit l'ensemble des rotations possibles en les filtrant selon des critères agronomiques paramétrables par l'utilisateur. Pour chaque culture, les données sont les dates de semis et de récolte, les durées d'interculture, le délai minimum avant de recultiver une culture sur une parcelle, la durée maximale d'une rotation sur la ferme ou le nombre maximal de cultures dans une rotation. ROTAT a été principalement utilisé pour évaluer les impacts de différentes systèmes de production sur des critères environnementaux et économiques, notamment pour des fermes maraîchères d'Uruguay (Dogliotti *et al.*, 2004). Dans le même esprit, Stockle *et al.* (2003) proposent le modèle bio-physique CropSyst pour simuler avec un pas de temps journalier les effets du climat, du sol et de la stratégie de gestion sur la productivité des systèmes de culture et sur l'environnement. L'outil, inspiré du modèle EPIC (Williams *et al.*, 1984), intègre des modèles de croissance des plantes qui permettent de simuler les réponses aux différents paramètres de l'environnement. Des rotations-types sont données en entrée par l'utilisateur. Bachinger et Zander (2007) développent ROTOR, un modèle basé sur des règles de décision conçu pour générer et évaluer des rotations de cultures durables pour les fermes biologiques en Europe centrale. Ce modèle très précis s'adapte aux contraintes propres du site étudié. ROTOR génère tout d'abord les successions possibles entre deux cultures en intégrant les intercultures (engrais verts ou semis sous couvert), puis évalue l'effet de chaque succession sur l'azote disponible dans les sols. A partir de cette donnée, il génère et évalue les rotations sur plusieurs années. Une seule culture commerciale est prise en compte à chaque saison.

2.3 Les problèmes de dimensionnement des équipements productifs et les problèmes avec coûts et temps fixes séquence-dépendants

De nombreux modèles quantitatifs s'intéressent au dimensionnement des équipements productifs en fonction des besoins de la ferme (Tsolakis *et al.*, 2014). Aurbacher *et al.* (2011) étudient les décisions d'achat de machinisme agricole dans une coopérative, d'un point de vue socio-économique. Bien que les simulations économiques montraient un bénéfice à long-terme pour tous les producteurs impliqués, grâce à une tarification différenciée, ceux-ci étaient réservés sur l'intérêt d'acheter une machine puissante commune en remplacement de leurs petites machines individuelles. Søgaard et Sørensen (2004) développent un modèle non linéaire pour sélectionner le meilleur niveau de mécanisation - tracteurs et matériel tracté - pour des fermes céréalières et valident leur modèle sur un cas concret. Willis et Hanlon (1976) intègrent le dimensionnement de la main d'œuvre, la capacité de stockage et le capital disponible pour replanter des parcelles d'arbres fruitiers dans leur modèle d'aide à la gestion de vergers. Pour Cittadini *et al.* (2008), l'aide à la décision en arboriculture fruitière nécessite des modèles récursifs pour prendre en compte l'impact des décisions d'une année sur l'autre, en particulier pour les décisions d'investissement sur l'irrigation, la gestion climatique ou pour le dimensionnement de la main d'œuvre.

Cependant, nous n'avons pas identifié de modèles agricoles traitant du dimensionnement simultané des équipements productifs, de la main d'œuvre et des itinéraires techniques. Des problèmes

proches peuvent être trouvés dans la littérature de Recherche Opérationnelle. Les problèmes d'ordonnancement sous contraintes de ressources (*resource-constrained project scheduling problem*) sont notamment étudiés dans des contextes industriels sous contraintes énergétiques (Artigues *et al.*, 2009). Certaines spécificités des problèmes énergétiques peuvent se retrouver dans le dimensionnement de la resource main d'œuvre de nos problèmes. Gupta et Magnusson (2005) étudient le problème de dimensionnement de lot et ordonnancement sous contrainte de capacité (*capacitated lot-sizing and scheduling problem, CLSP*) pour un cas à une seule machine. Leur problème se caractérise par des coûts et des temps de lancement, pour régler la machine pour chaque nouvelle série. Le réglage de la machine persiste d'une période à l'autre, même si aucune production n'a lieu à une période, tant qu'il n'est pas nécessaire de changer le réglage pour lancer une nouvelle série. Ce problème est NP-difficile et les auteurs proposent une heuristique pour le résoudre. Leur heuristique consiste à trouver une solution réalisable sans prendre en compte de coûts de réglage, puis de séquencer les tâches de production en tenant compte de ces coûts fixes, avant de chercher à améliorer la solution finale en évaluant l'intérêt de regrouper des lots de produits homogènes en une seule période. Guimarães *et al.* (2013) présentent une revue des différentes modélisations des problèmes de dimensionnement de lot et ordonnancement avec coûts et temps fixes. Ils distinguent des approches micro-périodes (au plus un changement de réglage a lieu pendant la période) et macro-périodes (plusieurs changements peuvent avoir lieu dans la même période. Une des formulations qu'ils présentent pour le CLSP, *capacitated lotsizing problem*, étendu aux décisions d'ordonnancement, correspond bien la partie de notre problème concernant les successions d'infrastructures. Dans l'article cité, il s'agit de minimiser les coûts de stockage et de changement de réglage de machines, tout en répondant à une demande donnée et en respectant une capacité temporelle. Les coûts et temps fixes sont dépendants de la séquence de produits à traiter.

Nous avons retenu les techniques développées pour les problèmes de dimensionnement de lot (*lot-sizing*) et ordonnancement (*scheduling*) avec coûts et/ou temps fixes. En effet, il nous est difficile d'utiliser les modèles de rotations agricoles du fait de la combinaison, dans notre problème, d'itinéraires techniques de différentes durées (pas de raisonnement annuel possible) et des contraintes de coûts et temps fixes séquence-dépendants. Nous nous inspirons de l'article de Guimarães *et al.* (2013) pour écrire les contraintes définissant les infrastructures en place et les changements d'infrastructures sur les parcelles.

Nous introduisons de nouvelles variables pour dissocier le changement d'infrastructure et le début des itinéraires techniques, liés aux courbes de production et aux besoins de main d'œuvre. Nous étudions des problèmes de planification et d'ordonnancement avec plusieurs parcelles, avec coûts et temps fixes, équivalents à des problèmes à plusieurs machines en génie industriel reconnus NP-difficiles (Pinedo, 2012).

3 Le modèle de dimensionnement stratégique en programmation linéaire mixte

Nous cherchons à ordonnancer les différents itinéraires techniques sur différentes parcelles de capacité donnée (leur aire). Chaque parcelle doit être aménagée avec une infrastructure adaptée à l'itinéraire technique souhaité et inversement, un itinéraire technique ne pourra être réalisé que si l'infrastructure nécessaire est installée. Chaque itinéraire technique peut être réalisé plusieurs fois et sur différentes parcelles, simultanément ou en décalé. Il n'est pas obligatoire de réaliser tous les itinéraires techniques.

Chaque itinéraire technique est constitué de tâches, telles que la plantation, la taille ou la récolte, qui nécessitent des ressources en trésorerie ou en main d'œuvre [1]. Les différentes tâches constituant un itinéraire technique sont agrégées en un profil de temps nécessaires et un profil de coût pour réaliser l'ensemble des tâches.

La durée des itinéraires techniques peut varier de quelques semaines (ex : laitue sous serre) à plusieurs années (ex : asperges, fruitiers). Le modèle que nous proposons inclut de nombreux paramètres, variables et contraintes. Pour faciliter sa compréhension, un métamodèle est présenté dans la figure 3.4. Les paramètres et les variables sont introduits dans les tables 3.1 et 3.2.

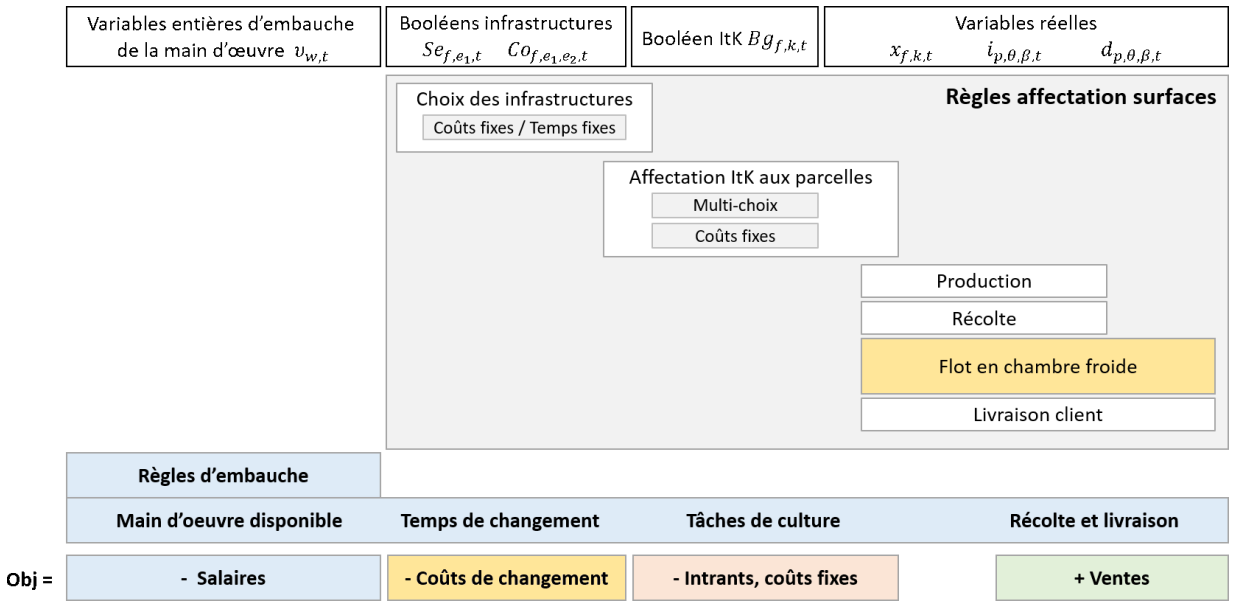


FIGURE 3.4 – *Représentation synthétique du modèle. ItK = itinéraire technique*

3.1 Maximiser le revenu pluri-annuel de la ferme

Nous cherchons à maximiser le revenu économique de la ferme Rev sur l'horizon de planification. Le revenu est composé des ventes de produits aux différents clients, caractérisés par leur demande (3.1) sur l'horizon de planification, dont sont soustraits les coûts des intrants (3.2), les coûts de main d'œuvre permanente, saisonnière et intérimaire (3.3) et les coûts fixes liés aux lancements des itinéraires techniques (3.4) et aux changements d'infrastructures (3.5). Nous considérons que les coûts de stockage sont fixes (investissement et consommation énergétique d'une chambre froide) et nous ne les intégrons pas au modèle d'optimisation. Le stockage des produits est géré avec les contraintes de périssabilité.

1. voir section 2.3 du chapitre 2

Indices	
$t \in T$	périodes de l'horizon de planification
$p \in P$	produits
$k \in K$	itinéraires techniques
$f \in F$	parcelles
$e \in E$	infrastructures
$bo \in BO$	familles botaniques des plantes
$w \in W$	catégorie d'ouvrier
$c \in Cl$	clients
$\beta \in 0..B_p$	durée de stockage en chambre froide
Paramètres généraux	
A_f	surface de la parcelle f (m^2)
$\Delta_{c,p,t}$	demande du client c en produit p à la période t (kg ou unités)
$\Pi_{c,p,t}$	prix de vente du produit p au client c à la période t (€/kg ou €/unité)
$Ce^{\mathsf{Co}}_{e_1,e_2}$	coût du changement de l'infrastructure e_1 à l'infrastructure e_2 par unité de surface
$Te^{\mathsf{Co}}_{e_1,e_2}$	temps de changement de l'infrastructure e_1 à l'infrastructure e_2 par unité de surface
tr_{min}	niveau de trésorerie minimum à respecter
B_p	délai avant élimination du produit de la chambre froide
$\Lambda_{p,\beta}$	fonction de perte en chambre froide
ρ_p	rendement de préparation des commandes en chambre froide (kg/h)
S_{max}	capacité de stockage en chambre froide (kg)
$Db_{bo,t}$	délai minimal avant le retour d'une plante de la même famille botanique sur la parcelle
Paramètres de l'itinéraire technique k	
$Av_{k,t}$	paramètre binaire, =1 si l'itinéraire k peut débuter en période t
Sc_k	coût fixe de lancement (€)
Vc_k	coût variable de lancement (€/m^2)
Dur_k	durée de l'itinéraire technique k
$Y_{k,t}$	rendement par période (kg/m^2)
ρ_k	rendement de cueille au champ (kg/h)
$J_{k,t}$	temps cumulé de réalisation des différentes tâches de culture de l'ItK k par période (h/m^2)
$C_{k,t}$	coût des tâches de culture (€/m^2)
$\Phi_{p,k}$	booléen, = 1 si l'ItK k génère le produit p
$eq_{e,k}$	booléen, = 1 si l'itinéraire k nécessite l'infrastructure e
$bot_{bo,k}$	booléen, = 1 si la plante cultivée dans l'itinéraire k appartient à la famille botanique bo

TABLE 3.1 – *Ensembles et paramètres du modèle*

$$\text{Max } Rev = \sum_{c,p,\beta,t} \Pi_{c,p,t} \cdot d_{c,p,\beta,t} \tag{3.1}$$

$$- \sum_{f,t} c^{\text{cult}}_{f,t} \tag{3.2}$$

$$- \sum_{t,w} \sum_{r=0}^{l_w} \sigma^{tot}_{w,r} \cdot \upsilon_{w,t-r} \tag{3.3}$$

$$- \sum_{f,k,t} Bg_{f,k,t} \cdot (Sc_k + A_f \cdot Vc_k) \tag{3.4}$$

$$- \sum_{f,e_1,e_2,t} Co_{f,e_1,e_2,t} \cdot Ce^{\text{Co}}_{e_1,e_2} \cdot A_f \tag{3.5}$$

Nous définissions la trésorerie journalière $tres_t$ comme le revenu de la ferme à une période t (contraintes 3.6). La trésorerie cumulée entre le début de l'horizon de planification et la période t doit rester supérieure à un certain seuil défini par le producteur tr_{min} (contraintes 3.7). Il s'agit de maximiser la fonction objectif, qui correspond à la trésorerie cumulée à la fin de l'horizon, tout en limitant les investissements et les dépenses au cours de l'horizon.

$$\begin{aligned} tres_t = & \sum_{c,p,\beta} \Pi_{c,p,t} \cdot d_{c,p,\beta,t} \\ & - \sum_{f} c^{\text{cult}}_{f,t} - \sum_{w} \sum_{r=0}^{l_w} \sigma^{tot}_{w,r} \cdot \upsilon_{w,t-r} \\ & - \sum_{f,k} Bg_{f,k,t} \cdot (Sc_k + A_f \cdot Vc_k) \\ & - \sum_{f,e_1,e_2} Co_{f,e_1,e_2,t} \cdot Ce^{\text{Co}}_{e_1,e_2} \cdot A_f \qquad \forall t \in T \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\sum_{r=1}^{t} tres_r \geq tr_{min} \qquad \forall t \in T \tag{3.7}$$

3.2 Contraintes sur les enchaînements d'infrastructures

Nous désignons par *infrastructure* un ensemble d'équipements et d'aménagements installés sur une parcelle pour permettre la mise en œuvre d'un itinéraire technique. Par exemple, une serre irriguée en pleine terre est une infrastructure, une serre irriguée et chauffée en pleine terre en est une autre. Passer d'une infrastructure e_1 à une infrastructure e_2 nécessite des travaux et des investissements, traduits dans le modèle par des coûts de changement $Ce^{\text{Co}}_{e_1,e_2}$ et des temps de changement $Te^{\text{Co}}_{e_1,e_2}$. Ces coûts et temps sont considérés ici proportionnels à la surface installée. Ils sont dépendants de la séquence d'infrastructures, le coût du passage d'un terrain nu à une serre chauffée ou à un tunnel froid n'étant pas les mêmes. Nous nous inspirons pour cette partie d'une des formulations présentées par Guimarães *et al.* (2013) pour les contraintes (3.8), (3.9) et (3.10).

Paramètres de la main d'œuvre	
$\mathbf{1}_{R_w}(t)$	période d'emploi possible d'un ouvrier de la catégorie w
Υ_w	effectif maximal d'ouvriers de la catégorie w pouvant être employés
$\sigma^{tot}_{w,t}$	salaire horaire des ouvriers de la catégorie w
$H_{w,t}$	heures de travail à la période t pour la catégorie w
l_w	durée du contrat de travail (en périodes)
e_w	efficacité d'un ouvrier de catégorie w
mg_t	temps dédié aux tâches de management, d'entretien et de déplacement à la période t, en % du temps total.
Variables de décision	
$tres_t$	trésorerie journalière de l'exploitation (non cumulée d'une période à l'autre)
$Se_{f,e,t}$	variable booléenne, $=$ 1 si la parcelle f est équipée de l'infrastructure e à la période t
$Co_{f,e_1,e_2,t}$	variable booléenne, $=$ 1 si l'infrastructure e_1 est remplacée par l'infrastructure e_2 en période t
$Bg_{f,k,t}$	variable booléenne, $=$ 1 si l'itinéraire technique k débute à la période t sur la parcelle f
$x_{f,k,t}$	quantité de produits disponibles à la période t sur la parcelle f cultivée avec l'itinéraire technique k
$i_{p,\beta,t}$	quantité de produit p commercialisable d'âge β stockée en chambre froide à la période t
$\bar{i}_{p,\beta,t}$	quantité de produit p perdue d'âge β stockée en chambre froide à la période t
$d_{c,p,\beta,t}$	quantité de produit p d'âge β livrée au client c à la période t
$\bar{d}_{p,\beta,t}$	quantité de produit p d'âge β éliminée de la chambre froide à la période t
$c^{\mathsf{cult}}_{f,t}$	coût des tâches de culture à la période t sur la parcelle f
$v_{w,t}$	nombre (entier) d'ouvriers de la catégorie w commençant leur contrat à la période t
h_t	temps de travail disponible à la période t
$h^z_{f,k,t}$	temps de travail dédié à la cueillette des produits commercialisables depuis l'itinéraire technique k sur la parcelle f à la période t
$h^d_{p,t}$	temps de travail dédié à la préparation de commande en chambre froide pour le produit p à la période t
$\bar{h}^d_{p,t}$	temps de travail dédié à l'évacuation des produits perdus p de la chambre froide pour le produit à la période t
$h^{\mathsf{cult}}_{f,t}$	temps de travail dédié aux tâches de culture à la période t pour la parcelle f
$h^{\mathsf{Co}}_{f,t}$	temps de travail dédié aux changements d'infrastructures sur la parcelle f

TABLE 3.2 – *Paramètres (suite de la table 3.1) et variables du modèle*

La figure 3.5 représente le lien entre les différentes variables booléennes qui définissent le type d'infrastructures installées $Se_{f,e,t}$, le changement d'infrastructure $Co_{f,e_1,e_2,t}$ et le début des itinéraires techniques $Bg_{f,k_1,t}$.

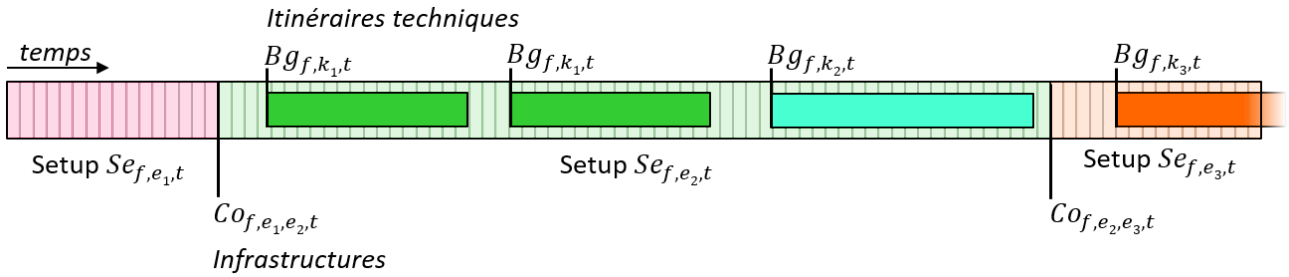


FIGURE 3.5 – *Liens entre les variables liant les cultures successives*

Pour chaque parcelle f, une seule infrastructure e doit être installée à chaque période t (cont. 3.8). Les contraintes (3.9) régissent les changements d'infrastructure d'une période à l'autre, en liant les infrastructures installées $Se_{f,e,t}$ aux changements d'infrastructure $Co_{f,e_1,e_2,t}$. Au plus un changement peut avoir lieu à chaque période (cont. 3.10). Un itinéraire technique k ne peut démarrer à la période t que si l'infrastructure nécessaire $eq_{e,k}$ est en place et aucun changement d'infrastructure ne peut avoir lieu pendant la durée de culture d'un itinéraire technique (cont. 3.11). Un itinéraire technique k ne peut démarrer à la période t que si la période t appartient à la fenêtre de temps propice au démarrage de l'itinéraire technique (cont. 3.12). Un itinéraire technique ne peut démarrer que si le précédent est terminé (cont. 3.13).

$$\sum_{e \in E} Se_{f,e,t} = 1 \qquad \forall f \in F, t \in T \qquad (3.8)$$

$$Se_{f,e_1,t} + \sum_{e_2 \in E} Co_{f,e_2,e_1,t} = \sum_{e_2 \in E} Co_{f,e_1,e_2,t} + Se_{f,e_1,t+1} \qquad \forall f \in F, t \in T, e_1 \in E \qquad (3.9)$$

$$\sum_{\substack{e_1 \in E, \\ e_2 \in E}} Co_{f,e_1,e_2,t} \leq 1 \qquad \forall f \in F, t \in T \qquad (3.10)$$

$$\sum_{r=0}^{min(Dur_k,t)} eq_{e,k} \cdot Bg_{f,k,t-r} \leq Se_{f,e,t} \qquad \forall f \in F, k \in K, e \in E, t \in T \qquad (3.11)$$

$$Bg_{f,k,t} \leq Av_{k,t} \qquad \forall f \in F, t \in T, k \in K \qquad (3.12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r=0}^{min(Dur_k,t)} Bg_{f,k,t-r} \leq 1 \qquad \forall f \in F, t \in T \qquad (3.13)$$

3.3 Enchaînements de familles botaniques

La prise en compte des infrastructures suffit pour régir les successions de culture en production hors-sol. Cependant, les fermes urbaines, notamment péri-urbaines, combinent fréquemment de la culture sans sol et de la culture en sol ou substrat, que ce soit dans des bacs, sur dalle ou en pleine terre. Nous ne prenons pas en compte ici l'impact du précédent cultural sur le rendement de la culture suivante. En effet, nous n'avons pas accès facilement à cette information pour la grande diversité de produits et de modes de culture que nous étudions. Pour tenir compte des contraintes agronomiques des cultures en sol ou substrat, nous introduisons un délai minimal $Db_{bo,t}$ avant le retour d'une culture de même famille botanique sur une parcelle (cont. 3.14). Ce délai est nul pour les cultures hors-sol.

$$\sum_{r=0}^{min(t,Db_{bo,t})} bot_{bo,k} \cdot Bg_{f,k,t} \leq 1 \qquad \forall f \in F, k \in K, bo \in BO, t \in T \tag{3.14}$$

3.4 Contraintes de production et de culture

Ces contraintes sont proches de celles présentées pour la gestion des stocks périssables dans le chapitre 2, à la différence près que seul le stock en chambre froide est pris en compte. La production au champ est considérée récoltée dès lors qu'elle arrive à maturité.

La production $x_{f,k,t}$ d'un itinéraire technique k est égale au rendement $Y_{k,t}$ décalé selon la date de début $Bg_{f,k,t}$ et multiplié par la surface A_f de la parcelle cultivée (cont. 3.15). La quantité de produit commercialisables est initialisée avec la somme des quantités produites par les itinéraires techniques associés au produit p (cont. 3.16). Les stocks initiaux en produits commercialisables $i_{p,\beta,t}$ et perdus $\bar{i}_{p,\beta,t}$ stockés depuis au moins une période sont nuls (cont. 3.17). Nous prenons en compte la périssabilité dans ce modèle, sous la forme de contraintes de flux sur un seul niveau, car la durée de vie des produits au champ est négligeable par rapport à l'horizon de planification de plusieurs années. Les produits au champ sont cueillis à maturité et peuvent être stockés au plus B_p périodes en chambre froide. Bien que le modèle soit utilisé pour planifier des périodes longues (2 à 20 ans), il nous semble utile de prendre en compte les stocks périssables. Certains produits, tels que les cucurbitacées, les légumes racines ou les pommes, ont des durées de conservations pouvant atteindre plusieurs mois. Pouvoir les stocker au lieu de les vendre immédiatement permet une réponse plus réaliste à la demande des clients. Comme dans le modèle du chapitre 2, des contraintes de flux sont définies pour lier les quantités commercialisables stockées $i_{p,\beta,t}$, les quantités stockées perdues $\bar{i}_{p,\beta,t}$, les quantités livrées $d_{c,p,\beta,t}$ et éliminées de la chambre froide $\bar{d}_{p,\beta,t}$, et la fonction de perte en chambre froide $\Lambda_{p,\beta}$.

Le stock commercialisable disponible correspond au stock de la période précédente diminué des ventes de produits et des pertes de produits périssables (cont. 3.18). La quantité de produits livrés aux clients ne peut dépasser ni le stock disponible (cont. 3.19) ni la demande des clients (cont. 3.20). Le stock de produits perdus est alimenté par les pertes du stock de produits commercialisables et ponctionné des produits éliminés par les ouvriers (cont. 3.21). Les ouvriers ne peuvent par éliminer plus de produits perdus qu'il n'y en a dans la chambre froide (cont. 3.22). La quantité de produits stockée ne peut dépasser la capacité de la chambre froide (cont. 3.23). Les produits doivent être vendus ou éliminés du stock avant l'âge B_p (cont. 3.24).

$$x_{f,k,t} = \sum_{r=0}^{\tau_{k,t}} Y_{k,r} \cdot A_f \cdot Bg_{f,k,t-r} \qquad \forall f \in F, t \in T, k \in K \tag{3.15}$$

$$i_{p,\beta,t} = \sum_{\substack{k \in K \\ f \in F}} \Phi_{p,k} \cdot x_{f,k,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \beta = 0 \tag{3.16}$$

$$i_{p,\beta,t} = \bar{i}_{p,\beta,t} = 0 \qquad \forall p \in P, t = 0, \beta > 0 \tag{3.17}$$

$$i_{p,\beta,t} = (i_{p,\beta-1,t-1} - \sum_{c \in C} d_{c,p,\beta,t}) \cdot (1 - \Lambda_{p,\beta-1}) \qquad \forall p \in P, t > 0, \beta > 0 \tag{3.18}$$

$$\sum_{c \in C} d_{c,p,\beta,t} \leq i_{p,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \beta \in B \tag{3.19}$$

$$\sum_{\beta \in B} d_{c,p,\beta,t} \leq \Delta_{c,p,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, c \in C \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} \bar{i}_{p,\beta,t} = (i_{p,\beta-1,t-1} - \sum_{c \in C} d_{c,p,\beta,t}) \cdot \Lambda_{p,\beta-1} \\ +(\bar{i}_{p,\beta-1,t-1} - \bar{d}_{p,\beta,t}) \qquad \forall p \in P, t > 0, \beta > 0 \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\bar{d}_{p,\beta,t} \leq \bar{i}_{p,\beta,t} \qquad \forall p \in P, t \in T, \beta \in B \tag{3.22}$$

$$\sum_{b \in B} (i_{p,\beta,t} + \bar{i}_{p,\beta,t}) \leq S_{max} \qquad \forall p \in P, t \in T, \beta \in B \tag{3.23}$$

$$i_{p,\beta,t} = \bar{i}_{p,\beta,t} = 0 \qquad \forall p \in P, t \in T, \beta = B_p \tag{3.24}$$

$$c^{\mathsf{cult}}_{f,t} = \sum_{k \in K} \sum_{r=0}^{\tau_{k,t}} C_{k,r} \cdot A_f \cdot Bg_{f,k,t-r} \qquad \forall f \in F, t \in T \tag{3.25}$$

La réalisation des différentes tâches de culture génère des coûts de production. Pour chaque parcelle, le coût de production dépend des itinéraires techniques k mis en œuvre et de leur date de début (cont. 3.25).

3.5 Contraintes de temps de travaux et de main d'œuvre

La main d'œuvre peut représenter 30 à 50% des charges opérationnelles d'une exploitation maraîchère. Les contraintes présentées ci-dessous permettent d'optimiser le dimensionnement de la main d'œuvre selon les objectifs de l'exploitant ; elles sont proches des contraintes présentées dans le modèle tactique du chapitre 2. Les contraintes propres à ce modèle concernent les temps de changement d'infrastructure (cont. 3.30).

La réalisation des tâches de culture requiert un temps spécifique à chaque itinéraire technique (cont. 3.26). Le temps de main d'œuvre dédié à la récolte des produits dans les parcelles est proportionnel à la production disponible. (cont. 3.27). La main d'œuvre peut aussi être mobilisée pour préparer des commandes et livraisons pour les clients à partir de produits stockés (cont. 3.28) ou pour éliminer les produits perdus de la chambre froide (cont. 3.29). Les changements d'infrastructure génèrent aussi des temps de main d'œuvre dépendant de la séquence d'infrastructures (cont. 3.30).

$$h^{\mathsf{cult}}_{f,t} = \sum_{k\in K}\sum_{r=0}^{\tau_{k,t}} J_{k,t}\cdot A_f \cdot Bg_{f,k,t-r} \qquad \forall f\in F, t\in T \qquad (3.26)$$

$$h^{z}_{f,k,t}\cdot \rho_k = x_{f,k,t} \qquad \forall f\in F, t\in T \qquad (3.27)$$

$$h^{d}_{p,t}\cdot \rho_p = \sum_{\beta\in B} d_{p,\beta,t} \qquad \forall p\in P, t\in T \qquad (3.28)$$

$$\bar{h}^{d}_{p,t}\cdot \bar{\rho}_p = \sum_{\beta\in B} \bar{d}_{p,\beta,t} \qquad \forall p\in P, t\in T \qquad (3.29)$$

$$h^{\mathsf{Co}}_{f,t} = \sum_{e_1,e_2\in E} Te^{\mathsf{Co}}_{e_1,e_2}\cdot Co_{f,e_1,e_2,t} \qquad \forall f\in F, t\in T \qquad (3.30)$$

$$h_t \geq (1+mg_t)\cdot\Big(\sum_{\substack{k\in K\\ f\in F}} h^{z}_{f,k,t} + \sum_{f\in F} h^{\mathsf{cult}}_{f,t} + \sum_{p\in P}(h^{d}_{p,t}+\bar{h}^{d}_{p,t}) + \sum_{f\in F} h^{\mathsf{Co}}_{f,t}\Big) \qquad \forall t\in T \qquad (3.31)$$

$$\sum_{t\in R_w} \upsilon_{w,t} \leq \Upsilon_w \qquad \forall w\in W \qquad (3.32)$$

$$\upsilon_{w,t} \leq \Upsilon_w \cdot \mathbf{1}_{R_w}(t) \qquad \forall w\in W, t\in T \qquad (3.33)$$

$$h_t = \sum_{w\in W}\sum_{r\in 0..l_w} H_{w,t}\cdot e_w \cdot \upsilon_{w,t-r} \qquad \forall t\in T \qquad (3.34)$$

Le volume horaire de main d'œuvre disponible chaque période h_t doit être supérieur aux besoins (cont. 3.31). Nous intégrons dans les besoins de main d'œuvre un temps de management mg_t, exprimé en % des besoins totaux [2]. Des contraintes de type sac-à-dos [3] sont définies pour sélectionner les profils de main d'œuvre à engager. Différentes catégories w d'ouvriers sont définis pour intégrer la variété des profils intervenant sur les fermes. Le nombre d'heures de travail par période $H_{w,t}$ dépend de la catégorie d'ouvriers. Le nombre d'ouvriers engagés $\upsilon_{w,t}$ ne doit pas dépasser les effectifs disponibles pour chaque catégorie w d'ouvriers (cont. 3.32). Les ouvriers peuvent démarrer leur contrat de travail seulement dans une certaine fenêtre calendaire R_w (cont. 3.33). Nous définissons la main d'œuvre effectivement disponible sur la ferme h_t (cont. 3.34. Des profils de main d'œuvre intérimaire viennent compléter ponctuellement la main d'œuvre disponible en contrats plus longs.

4 Résultats numériques sur un cas concret

Nous présentons pour ce modèle une étude de cas réalisée sur une ferme exploitée par les *Fermes de Gally*.

2. L'explication du temps de management est donnée au chapitre 2
3. Voir présentation du problème de sac-à-dos page 59.

4.1 Présentation de la ferme étudiée

Les *Fermes de Gally* ont investi en 2015 dans une ancienne exploitation horticole située dans les Yvelines. L'exploitation horticole, représentée sur la figure 3.6, comprend plus de 12 000 m^2 de serres en verre, 3000 m^2 de tunnels de culture, 1100 m^2 de serre multi-chapelle en couverture plastique ainsi que 15 000 m^2 de surface en pleine terre. La production horticole est l'activité principale de cette ferme. La concurrence d'outils de production horticole de plus grande taille, plus modernes et plus efficaces, notamment aux Pays-Bas, rend difficilement viable des outils horticoles de petite taille et vieillissants comme la ferme étudiée. Nous nous posons donc la question de réorienter la production vers de la production maraîchère en circuits courts, pour valoriser la proximité des consommateurs.

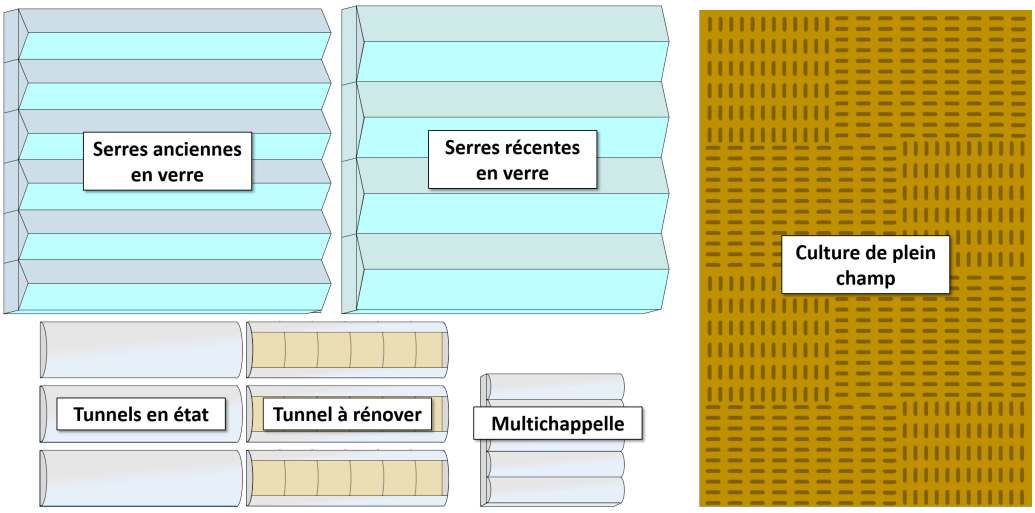


FIGURE 3.6 – *Plan simplifié de la ferme étudiée*

Pour sélectionner les scénarios d'évolution de la ferme, nous avons recherché des données sur les itinéraires techniques adaptés aux infrastructures et au contexte du projet. Les données utilisées dans le chapitre 2 ne présentaient pas la diversité d'infrastructures et de produits recherchée. Nous nous sommes basés sur les fiches d'itinéraires techniques de Argouarc'h (2005) pour constituer une base de 91 itinéraires répartis dans quatre types d'infrastructures pour cultiver 35 produits différents (voir table 3.3). Nous nous basons sur des données peu détaillées, et nous avons dû approximer la répartition des temps et des coûts des tâches de culture sur la durée de l'itinéraire technique, à partir de données sur le temps global et le coût global par unité de surface. Nous avons concentré la majeure partie des temps et coûts de culture autour de la plantation au début de chaque itinéraire technique. N'ayant pas de courbe de production détaillée pour les itinéraires techniques étudiés, nous avons considéré un rendement constant sur la période de production de chaque itinéraire.

Pour intégrer les changements d'infrastructures, nous avons réalisé un chiffrage estimatif des investissements nécessaires à la remise en état des différentes zones (table 3.4). Un coût infini est fixé quand le changement d'une infrastructure e_1 à une infrastructure e_2 n'est pas autorisé dans l'instance. La construction d'une serre représente un coût important pour l'exploitant et son investissement devra être en cohérence avec les itinéraires techniques et les débouchés envisagés. Les parcelles sont définies en fonction des infrastructures installées, comme présenté sur la figure 3.6. Enfin, nous reprenons les profils de main d'œuvre présentés dans le chapitre 2 et les prix des produits sont issus de l'Observatoire National des Marchés (FranceAgriMer, 2017).

Produit	Plein Air	Tunnel	Serre	**Total**	Produit	Plein Air	Tunnel	Serre	**Total**
Ail	2			**2**	Fève		1		**1**
Aromatique	1	1	1	**3**	Fraise	3	2		**5**
Artichaut	1			**1**	Haricot	2	1		**3**
Aubergine		1	2	**3**	Laitue	5		2	**7**
Bette	1			**1**	Mâche	1	1		**2**
Betterave	2			**2**	Navet	4			**4**
Brocoli	2			**2**	Oignon	1	1		**2**
Carotte	1	1		**2**	Poireau	2			**2**
Cél. branche	1	1		**2**	Pois	1	1		**2**
Céleri rave	1			**1**	Poivron		1	2	**3**
Chicorée	1	3		**4**	P. de terre	2	1		**3**
Chou	3			**3**	Radis	1	1		**2**
Chou-fleur	4			**4**	Radis long	1			**1**
Concombre	1	2	1	**4**	Tomate		1	2	**3**
Courge	2			**2**	Tom Ancien.		1	2	**3**
Courgette	1	1		**2**	Tom Cerise		1	2	**3**
Echalotte	1			**1**	Tom Grappe		1	2	**3**
Epinard	2	1		**3**					
					Total	**50**	**25**	**16**	**91**

TABLE 3.3 – *Nombre d'itinéraires techniques pour les différents produits et infrastructures présents dans l'instance. Les infrastructures incluent toutes l'irrigation ici*

	Infrastructure d'arrivée							
Infrastructure départ	Plein air	Plein air irrig	Tunnel à rép.	Tunnel état	Tunnel irrig	Serre à rép.	Serre état	Serre irrig
Plein air	0	3	∞	25	28	∞	200	203
Plein air irrigué	4	0	∞	29	32	∞	204	207
Tunnel à réparer	15	18	0	15	18	∞	215	222
Tunnel en état	15	18	∞	0	3	∞	215	218
Tunnel irrigué	19	22	∞	4	0	∞	219	222
Serre à réparer	120	123	∞	145	148	0	60	63
Serre en état	120	123	∞	145	148	∞	0	3
Serre irriguée	124	127	∞	149	152	∞	4	0

TABLE 3.4 – *Coûts de changement d'infrastructure dans le cas concret étudié, en euros/m²*

4.2 Méthodologie de test du programme linéaire et résultats numériques

Nous testons le programme linéaire selon différentes modalités à partir de l'instance présentée ci-dessus. Les modalités considérées sont les suivantes :

— La surface de l'exploitation est divisée en *deux ensembles de parcelles* à deux granulométries. Dans la modalité à 6 parcelles, nous considérons les grands ensembles présentés sur la figure 3.6 : serres anciennes, serres modernes, tunnels en état, tunnels à réparer, multichapelle et plein air. Dans la modalité à 15 parcelles, les subdivisions de ces grandes parcelles sont prises en compte : 7 parcelles de serre, 6 abris, 1 multichapelle et une parcelle en plein air.

— 3 *durées de planification* : 2 ans, 5 ans ou 10 ans.

— 3 *pas de temps* différents : 1 semaine (52 périodes par an), 2 semaines (26 périodes par an) ou 1 mois (12 périodes par mois).

— Prise en compte, ou non, des contraintes de *délai minimal avant le retour d'une plante* de la même famille botanique sur la parcelle (contraintes 3.14).

— La *trésorerie minimale* autorisée est fixée à -100 k€ (contraintes 3.7), afin de limiter les investissements initiaux.

Le programme linéaire mixte est résolu avec CPLEX 12.6 sur la même configuration que précédemment. Nous définissons une limite de temps de résolution à 3600 secondes pour les différentes instances. La synthèse des résultats sur ces différentes modalités est présentée dans la figure 3.7. La première table rassemble les temps de résolution en fonction de la durée de l'horizon de planification (nbAns), du nombre de périodes par an (nbPer/An), du nombre de parcelles (nbParc) et de l'activation ou non des contraintes botaniques (Cont.Bota). Les temps de résolution augmentent de façon exponentielle avec la taille de l'instance, principalement en raison du nombre de variables booléennes dans notre formulation. Pour les modalités à 15 parcelles et/ou avec un horizon de planification de 5 à 10 ans, la solution optimale n'a pas pu être trouvée dans la limite de temps. Pour la plus grand instance, la construction du programme linéaire mixte dépasse les capacités de mémoire de l'ordinateur.

TEMPS DE RESOLUTION DU MODELE EN PROGRAMMATION LINEAIRE MIXTE (temps en secondes)

	nbAns	2 ans			5 ans			10 ans		
	nbPer/An	12 per	26 per	52 per	12 per	26 per	52 per	12 per	26 per	52 per
nbParcelles	Cont.Bota									
6 parc	Oui	1	32	39	8	868	2348	27	*> 3600*	*> 3600*
	Non	3	11	34	6	147	1357	18	*> 3600*	*> 3600*
15 parc	Oui	6	*> 3600*	*> 3600*	21	*> 3600*	*> 3600*	126	*> 3600*	*mem.*
	Non	4	1036	943	29	*> 3600*	*> 3600*	54	*> 3600*	*mem.*

REVENU MOYEN PAR AN *ET ECART FINAL ENTRE LES BORNES*

	nbAns	2 ans			5 ans			10 ans		
	nbPer/An	12 per	26 per	52 per	12 per	26 per	52 per	12 per	26 per	52 per
nbParcelles	Cont.Bota									
6 parc	Oui	0 € *0.0%*	33 511 € *0.0%*	408 608 € *0.0%*	0 € *0.0%*	34 461 € *0.0%*	443 499 € *0.0%*	0 € *0.0%*	34 060 € *170.7%*	475 017 € *12.0%*
	Non	0 € *0.0%*	60 929 € *0.0%*	466 072 € *0.0%*	0 € *0.0%*	69 431 € *0.0%*	531 999 € *0.0%*	0 € *0.0%*	71 802 € *81.6%*	576 923 € *8.9%*
15 parc	Oui	0 € *0.0%*	131 575 € *15.0%*	475 349 € *0.1%*	0 € *0.0%*	259 348 € *7.8%*	564 837 € *13.2%*	0 € *0.0%*	279 340 € *19.9%*	*mem.*
	Non	0 € *0.0%*	144 883 € *0.0%*	588 910 € *0.0%*	0 € *0.0%*	288 237 € *2.6%*	674 092 € *7.8%*	0 € *0.0%*	334 572 € *4.6%*	*mem.*

L'inscription *mem.* signifie que la capacité mémoire de l'ordinateur est dépassée pour les instances concernées.
Les cases au fond coloré correspondent aux solutions analysées dans la suite du chapitre.

FIGURE 3.7 – *Synthèse des temps de résolution et des résultats des différentes instances testées*

La seconde table de la figure présente les revenus moyens annuels, obtenus en divisant l'objectif atteint dans les solutions par le nombre d'années de l'horizon de planification, ainsi que l'écart final entre les bornes lorsque l'optimalité n'est pas atteint au bout de 3600 secondes. Aucune solution rentable n'est trouvée sur les modalités à 12 périodes de 1 mois par an, alors que des solutions rentables sont trouvées pour des pas de temps de 1 ou 2 semaines. Plus le pas de temps est fin, plus il est possible de combiner efficacement dans le temps et dans l'espace des itinéraires techniques, des investissements et de la main d'œuvre. Avec un pas de temps de 1 mois, la solution la plus rentable est de ne pas produire. Nous identifions deux raisons principales à ces résultats. En premier lieu, nous n'autorisons qu'un changement d'infrastructure, qu'en début d'itinéraire technique à chaque période pour chaque parcelle. L'augmentation de la durée du pas de temps restreint les possibilités d'intercaler des itinéraires techniques pour lisser les pics de production et de main d'œuvre. En second lieu, la prise en compte de la périssabilité des produits apporte d'autant plus de souplesse

dans le dimensionnement de la ferme que le pas de temps est réduit. Plus le pas est est fin, plus nous avons de finesse dans la gestion de la production, des stocks et de la main d'œuvre, ce qui permet plus de souplesse dans la planification.

La formulation actuelle, basée sur un grand nombre de variables binaires, est consommatrice en mémoire et en temps de résolution. Elle permet l'utilisation du modèle sur des cas réels, sauf pour les instances de grande taille avec un pas de temps court.

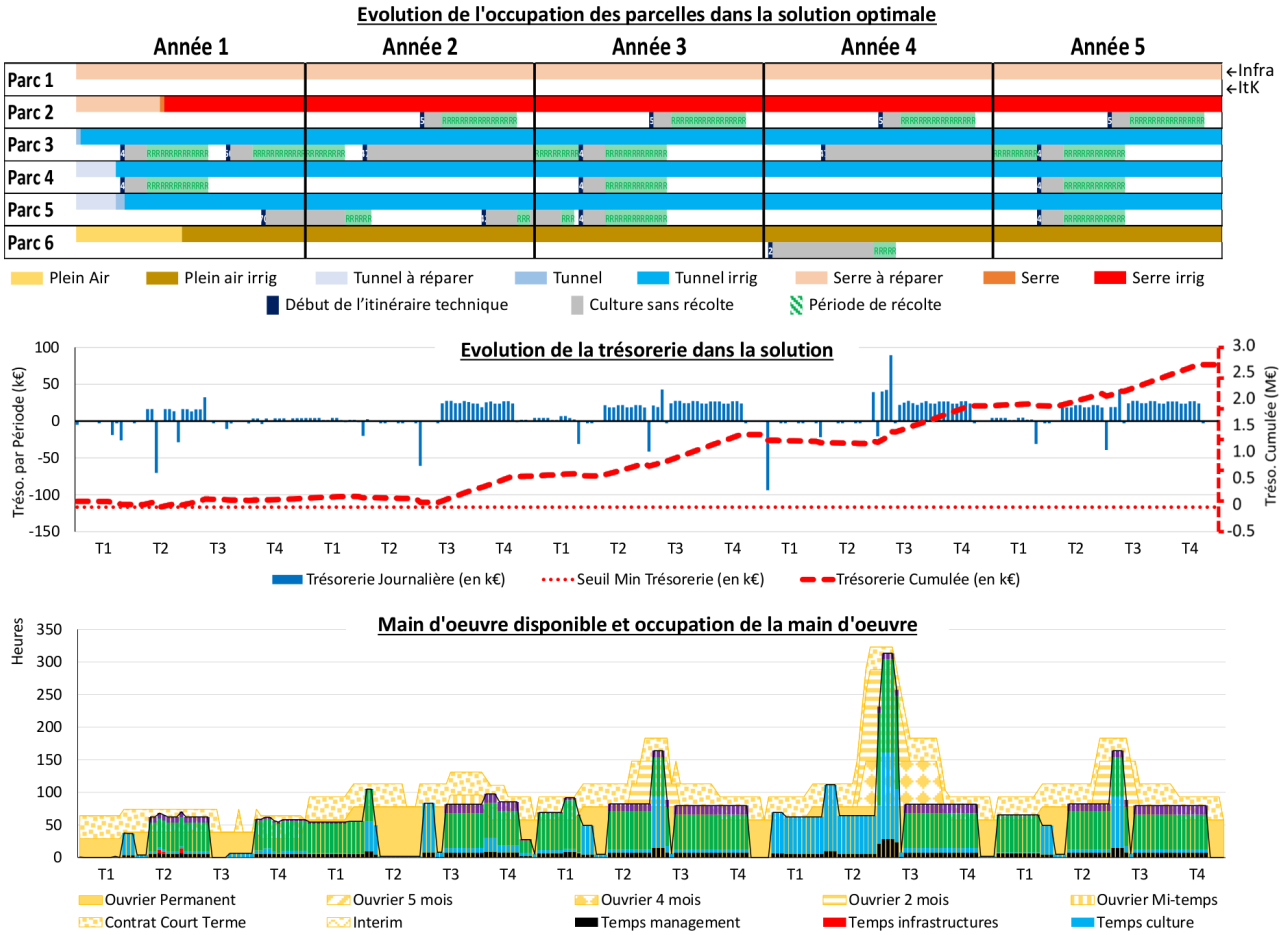


FIGURE 3.8 – *Solution pour l'instance 6 parcelles sur 5 années de 52 périodes, avec contraintes botaniques*

Les figures 3.8 et 3.9 offrent une représentation des solutions pour la même instance de la ferme divisée en 6 parcelles pour une planification sur 5 ans à 52 périodes par an. Les deux modalités diffèrent seulement par l'activation des contraintes botaniques (contraintes 3.14) pour obtenir la solution présentée dans la figure 3.8 alors que ces contraintes sont désactivées pour obtenir la solution de la figure 3.9. La partie haute de la figure représente, pour chaque parcelle, l'infrastructure en place à chaque période et les itinéraires techniques qui y sont mis en œuvre. La partie centrale présente l'évolution des revenus à chaque périodes (barres, axe de gauche) et l'évolution de la trésorerie cumulée sur l'horizon de planification (courbe, axe de droite). Enfin, la partie basse illustre les besoins en main d'œuvre pour les différents types de tâches (barres, au premier plan) et la main d'œuvre employée dans la solution (aires en arrière plan). Nous pouvons observer que le développement de l'exploitation respecte bien le seuil de trésorerie minimal fixé à -100 k€ et que, dans ce contexte, toutes les parcelles ne sont pas exploitées. Dans la solution de la figure 3.8, aucun investissement n'est fait pour remettre en état la parcelle 1 et la cultiver et la parcelle 6 n'est que rarement exploitée. L'investissement et la limite de trésorerie ne sont pas les

seules raisons de cette "sous-exploitation" des surfaces disponibles. La solution est constituée d'une combinaison cohérente d'itinéraires techniques qui minimise les charges de main d'œuvre ; cultiver une plus grande surface nécessiterait l'embauche de salariés supplémentaires qui ne seraient pas occupés à 100%. Le graphique de main d'œuvre montre d'importantes périodes d'inactivité pour la main d'œuvre employée. Proposer une plus grande diversité d'itinéraires techniques et des parcelles plus petites permettrait une meilleure valorisation de la main d'œuvre, en permettant plus de finesse et de souplesse dans la planification.

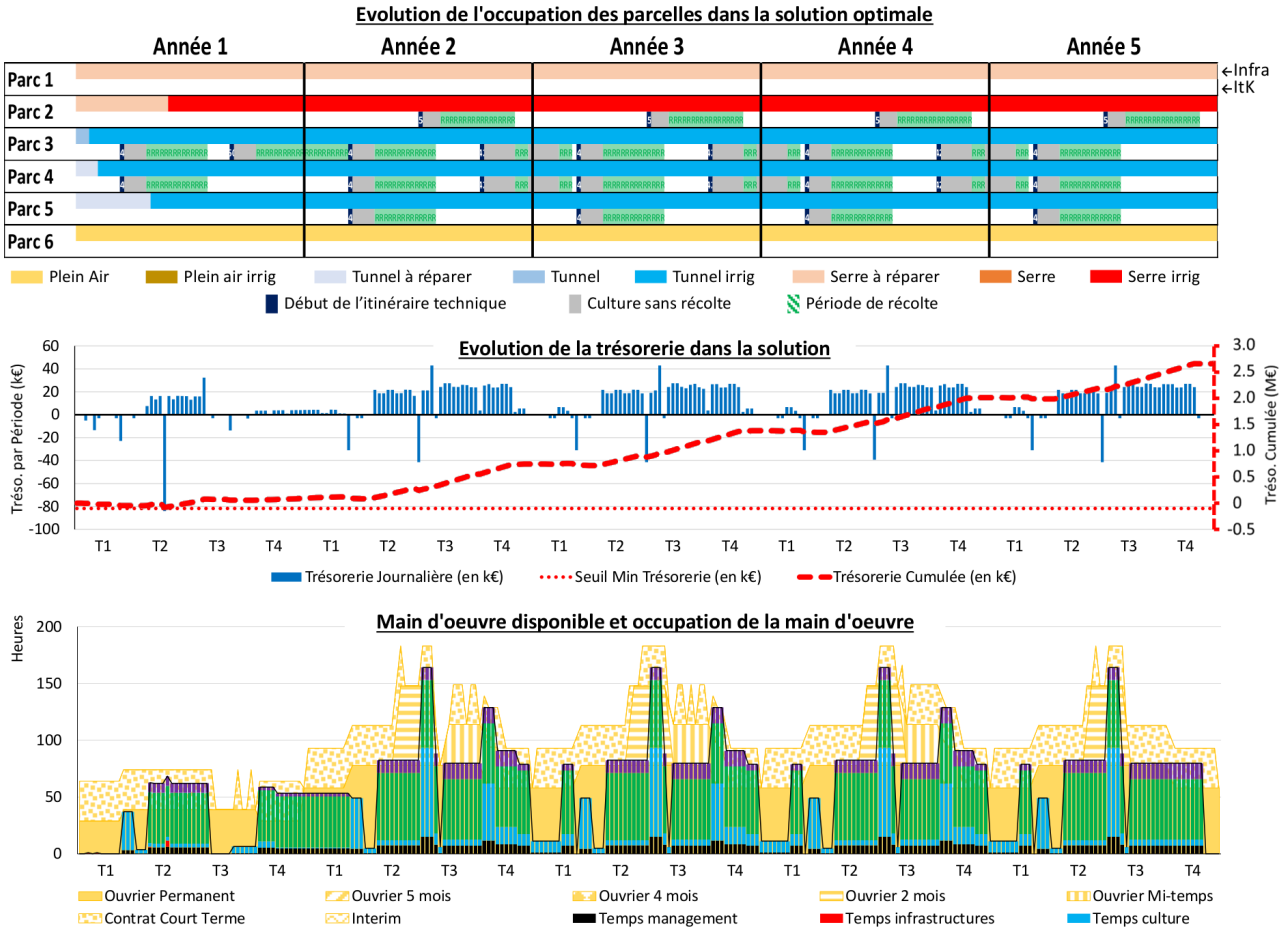


FIGURE 3.9 – *Solution pour l'instance 6 parcelles sur 5 années de 52 périodes, SANS contraintes botaniques*

En n'activant pas les contraintes de délai minimal avant le retour d'une plante de la même famille botanique, le modèle dispose de plus nombreux choix de combinaison et de succession d'itinéraires techniques. Dans la solution sans contraintes botaniques présentée sur la figure 3.9, 4 parcelles sur les 6 disponibles sont cultivées, mais elles le sont plus intensivement que dans la solution avec contraintes botaniques. Les itinéraires techniques s'y succèdent avec un plus faible temps d'interculture. Ces successions rapides permettent une meilleure valorisation des surfaces disponibles mais aussi un meilleur taux d'occupation de la main d'œuvre, et entraîne une augmentation de 20% du revenu moyen annuel par rapport à la solution avec contraintes botaniques.

Enfin, la figure 3.10 illustre les résultats obtenus pour la même instance, avec contraintes botaniques, dans le cas où la surface de la ferme est divisée en 15 parcelles. Cette granulométrie spatiale plus fine permet un meilleur lissage des pics de main d'œuvre, production et de trésorerie. Les investissements d'infrastructures sont répartis dans le temps, les derniers investissements (parcelles 1, 6, 7 et 15) étant financés par la vente des récoltes issues des premières parcelles aménagées (parcelles

8 à 14). De la sorte, la trésorerie se maintient juste au dessus du seuil fixé. Du fait des parcelles plus petites, la combinaison des itinéraires techniques dans la solution permet un dimensionnement de la main d'œuvre plus proche des besoins que dans les solutions précédemment présentées.

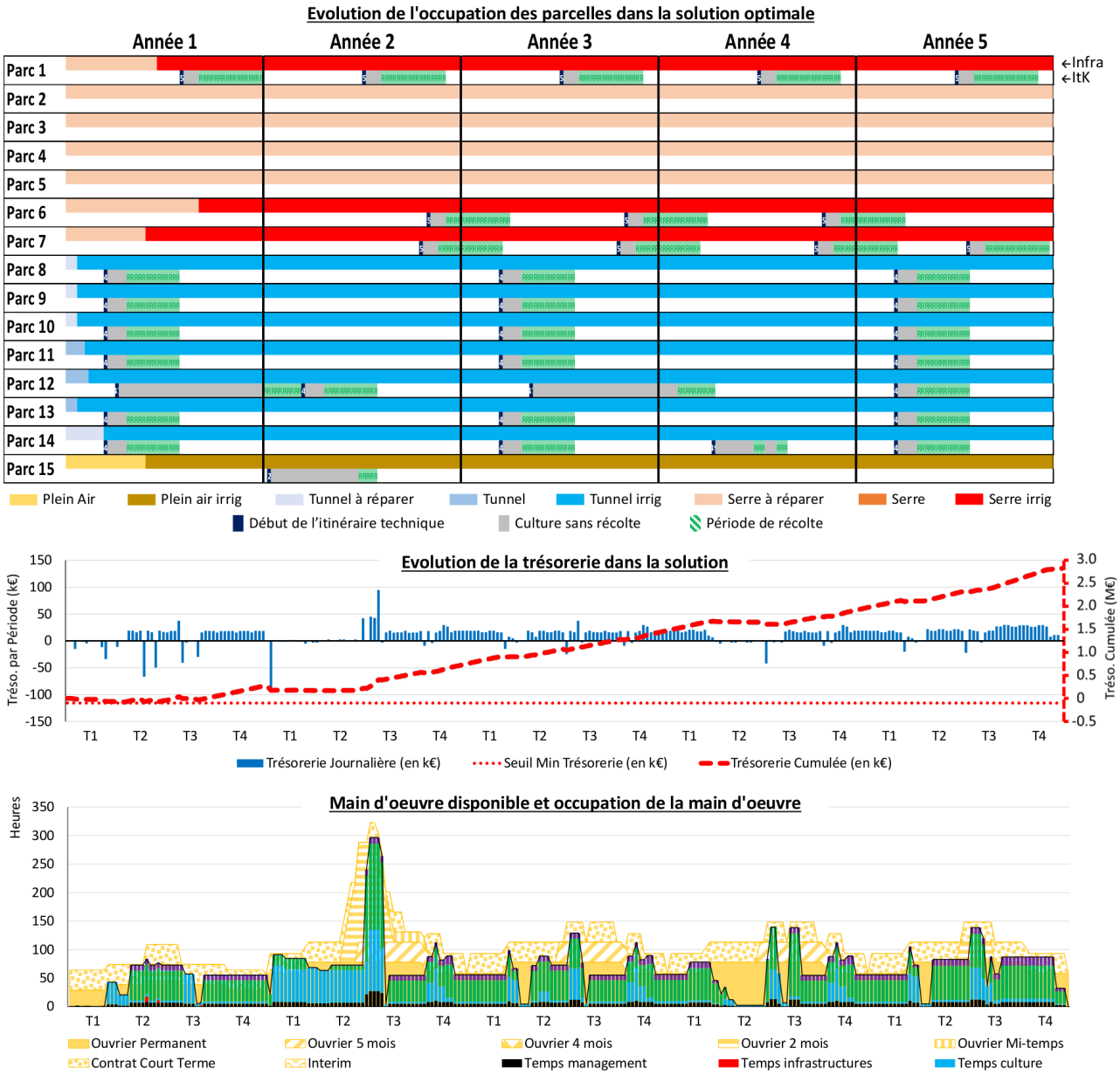


FIGURE 3.10 – *Solution pour l'instance 15 parcelles sur 5 années de 52 périodes, avec contraintes botaniques*

5 Conclusion et perspectives

Le modèle présenté dans ce chapitre aide au dimensionnement et la planification stratégique des investissements matériels et humains pour maximiser le revenu agricole d'une ferme maraîchère en réponse à des demandes connues de clients. Ce modèle en programmation linéaire mixte intègre les coûts et les temps liés à l'installation des infrastructures productives, telles que les serres, les tunnels ou les réseaux d'irrigation. Il intègre aussi la gestion des stocks périssables ainsi qu'un délai

minimal avant le retour d'une plante de même famille botanique sur une parcelle pour prendre en compte les contraintes agronomiques. De la sorte, notre modèle permet de combiner des itinéraires techniques en pleine terre et des itinéraires techniques hors-sol sur une même exploitation.

Nous avons testé le programme sur la base du cas concret d'une exploitation horticole que les *Fermes de Gally* souhaitent reconvertir en exploitation maraîchère. Malgré des données d'entrée incomplètes, notamment les itinéraires techniques, les solutions obtenues sont réalistes et simulent bien le fonctionnement d'une ferme diversifiée. Ce cas d'études, basé sur la problématique concrète d'une ferme à la recherche d'une nouvelle dynamique, valide l'intérêt de notre modèle stratégique pour planifier les investissements et les embauches de main d'œuvre sur plusieurs années. Cependant, il apparaît sur les instances testées que la formulation fondée sur de nombreuses variables booléennes définit un programme linaire mixte très consommateur en mémoire et en temps de résolution, limitant son utilisation pour des cas réels avec un pas de temps adapté.

Afin d'améliorer les performances du programme linéaire mixte, nous envisageons de filtrer les variables et contraintes lors de la construction du programme pour ne garder que celles qui sont actives selon les paramètres de l'instance. Selon la demande des clients ou les paramètres des parcelles, certains itinéraires techniques ou certains produits ne seront jamais utilisés. De même, certains types d'infrastructures ne peuvent pas se succéder sur une parcelle (par exemple, passer d'une serre sur dalle béton à une culture en pleine terre). En définissant un algorithme pour éliminer les variables et contraintes inutiles, le programme linéaire mixte pourrait être allégé en variables booléennes. Par ailleurs, nous pourrions étudier l'intérêt de raisonner sur un horizon glissant, en planifiant sur quelques années et en utilisant la solution du modèle comme donnée d'entrée pour planifier les années suivantes. Enfin, le modèle actuel privilégie des itinéraires techniques les plus productifs et les moins consommateurs de main d'œuvre. Dans les solutions présentées, un faible nombre de produits est cultivé en grandes quantités. Il sera intéressant de mieux définir les demandes clients pour obtenir une diversité de produits plus réaliste. Cette demande client peut être obtenue à partir du modèle de sélection des clients présenté au chapitre suivant.

4 Un modèle stratégique de sélection des clients de fermes maraîchères

Résumé du chapitre

Nous étudions dans ce chapitre le problème de la sélection de la combinaison de clients la plus profitable pour vendre la production périssable d'une ferme maraîchère. Le producteur identifie différents clients potentiels, chacun ayant une demande spécifique : certains définissent des quantités, des prix et des dates de livraisons fixes, d'autres demandent la livraison régulière d'une certaine diversité de produits. Le producteur peut acheter des produits à d'autres fermes s'il n'est pas en mesure de les fournir.

Nous présentons un modèle en programmation linéaire mixte qui maximise le profil de la vente d'une production donnée, en présence de capacités de main d'œuvre. Des sous-modèles sont proposés pour définir les caractéristiques de quatre circuits de distribution : les marchés de producteurs, les Amap, la vente contractuelle à des entreprises et les grossistes. Nous étudions les solutions obtenues sur un cas concret, ainsi que les performances du modèle en termes de temps de résolution.

Ce travail a fait l'objet d'une communication scientifique au cours du congrès IFAC en 2017 à Toulouse (Brulard *et al.*, 2017a).

Contexte

Alexis et Benjamin ont lancé leur production pour l'année et commencent à développer leurs réseaux de distribution. Ils visent les circuits courts comme les Amap* ou les marchés de producteurs, qui apportent une meilleure valorisation des produits. Mais ils sont conscients des limites de ces circuits : temps de préparation et de commercialisation importants, variabilité de la demande, faibles volumes de vente. Ils souhaitent choisir la meilleure combinaison de débouchés commerciaux pour vendre au mieux toute la production de l'année, en prenant en compte les caractéristiques de chacun de ces débouchés : distance, diversité de produits demandée, prix, temps de préparation, périodicité, etc.
De plus en plus de consommateurs demandent des produits locaux, mais les contraintes d'approvisionnement sont fortes pour les producteurs. Tout d'abord, le choix des débouchés et le dimensionnement de la ferme sont fortement liés, notamment du fait du caractère périssable des fruits et légumes cultivés, qui ne peuvent être stockés que quelques temps. Un producteur qui commercialise en Amap, doit produire une grande variété de produits tout au long de l'année, alors qu'il peut se spécialiser dans quelques productions s'il vend à un grossiste. La complexité du système de production est bien différente dans ces deux cas, tous comme le sont les investissements. Le producteur doit faire un compromis entre des marchés à faible volume et forte valeur (vente directe, Amap) et des marchés à grand volume et faible valeur via des grossistes. Ce compromis tient compte de l'occupation d'une main d'œuvre coûteuse pour la production et la commercialisation. Production diversifiée et vente directe sont des activités très consommatrices de main d'œuvre. Enfin, en contractualisant avec des clients, les producteurs s'engagent à livrer l'intégralité de la demande ; cela impose une planification rigoureuse de la production.

* Association pour le Maintien de l'Agriculture Paysanne, voir section 4.3.2 de ce chapitre.

Le modèle que nous présentons ici sélectionne la combinaison de clients la plus rentable pour commercialiser une production donnée au cours de l'année, en fonction des ressources de l'exploitation. Nous prenons en compte la périssabilité des produits et la nature saisonnière des productions. Le producteur peut recourir à l'achat-revente s'il n'est pas en mesure de produire l'intégralité de la demande. Ce chapitre est organisé de la façon suivante. Après une description du problème dans la première section, nous réalisons une revue de la littérature en section 4.2, puis nous décrivons le modèle proposé en section 3, avec un focus sur les caractéristiques des différentes demandes. Enfin, nous procédons à une analyse théorique de la complexité du problème en section 4.4 et nous présentons des résultats numériques en section 4.5.

1 Description du problème de sélection des clients

Nous nous intéressons à un maraîcher qui produit une gamme P^{f} de fruits et légumes périssables p. A chaque période $t \in T$, la ferme génère un rendement de $Y_{p,t}$ kg de produit p. Le maraîcher peut viser plusieurs clients à une distance raisonnable de sa ferme, chacun de ces clients ayant des caractéristiques spécifiques. Le producteur souhaite savoir quel(s) marché(s) sélectionner pour tirer le meilleur profit de sa production (figure 4.2).

	Modèle de planification tactique	Modèle de dimensionnement stratégique	Modèle de sélection des clients
PARAMETRES DU MODELE			
Horizon temporel	1 an	2 à *n* ans	1 an
Pas de temps	1 jour à 1 semaine	1 semaine à 2 mois	1 jour à 1 semaine
Achat-revente auprès d'autres fermes	*Non considéré*	*Non considéré*	Défini par le modèle
Gestion de la périssabilité	Flux à 2 niveaux : stock au champ et en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide	Flux de produits à 1 niveau : stock en chambre froide
Caractéristique de la demande	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Quantités et prix par période et par client pour chaque produit	Structure de demande spécifique à chaque client
DECISIONS A PRENDRE			
Sélection des produits cultivés	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Donnée d'entrée
Sélection des méthodes de production	Définie par le modèle	Définie par le modèle	*Non considérée*
Surface des parcelles	Définie par le modèle	Donnée d'entrée	*Non considérée*
Succession de cultures	*Non considérée*	Définie par le modèle	*Non considérée*
Sélection des profils de main d'œuvre	Définie par le modèle	Définie par le modèle	Main d'œuvre fixe, intérim possible
Sélection des clients	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Quantités livrées au plus offrant, dans la limite de la demande	Obligation de répondre à l'intégralité de la commande des clients sélectionnés.

FIGURE 4.1 – *Positionnement du problème traité dans ce chapitre*

Nous avons réalisé une caractérisation des différents types de demandes en circuit court ou de proximité accessibles à un producteur. Parmi ces demandes, nous avons modélisé les plus fréquentes dans les situations étudiées. Quatre marchés cibles sont pris en compte :

1. *Marchés de producteurs :* Les maraîchers peuvent vendre leurs produits directement aux consommateurs sur des marchés de producteurs, à condition d'obtenir une place de marché. Ce mode de commercialisation impose de disposer d'une diversité de produits suffisante et de volumes importants pour que le marché soit profitable. D'une part, il faut un étal fourni pour attirer le chaland, d'autre part, il faut que les ventes couvrent les coût fixes (coût de la main d'œuvre de vente, frais de transport, prix de la place).
2. *Vente de paniers en Amap* : Dans le système d'Amap, les consommateurs s'engagent contractuellement sur toute la saison avec un ou plusieurs producteurs, pour recevoir une part de la production de fruits, légumes, pain ou encore viande. Le producteur peut vendre ses produits en direct à un bon prix, mais il doit fournir une diversité de produits tout au long de l'année et consacrer un temps important à la préparation et à la vente des paniers.
3. *Demande contractuelle :* les clients entreprises, comme les sociétés de restauration, lancent des appels d'offres précisant les produits, les quantités et les prix souhaités à des périodes données pour l'année ou les années à venir. Les prix de ces marchés sont plus faibles qu'en vente directe, mais la contractualisation permet au maraîcher de planifier sa production sur des volumes importants.
4. *Grossistes :* Les grossistes peuvent acheter des gros volumes de produits à bas prix quand le producteur ne trouver pas de marché plus rémunérateur ou qu'une main d'œuvre limitante l'empêche de pratiquer la vente directe.

Pour cibler des clients comme les Amap, les marchés de producteurs ou la demande contractuelle, le producteur doit être en mesure de fournir l'intégralité de la demande, que ce soit en quantité, en qualité ou en diversité de produits pendant toute la durée du contrat. Nous considérons que les grossistes peuvent être livrés sans volume fixe contractualisé, sous réserve de respecter des

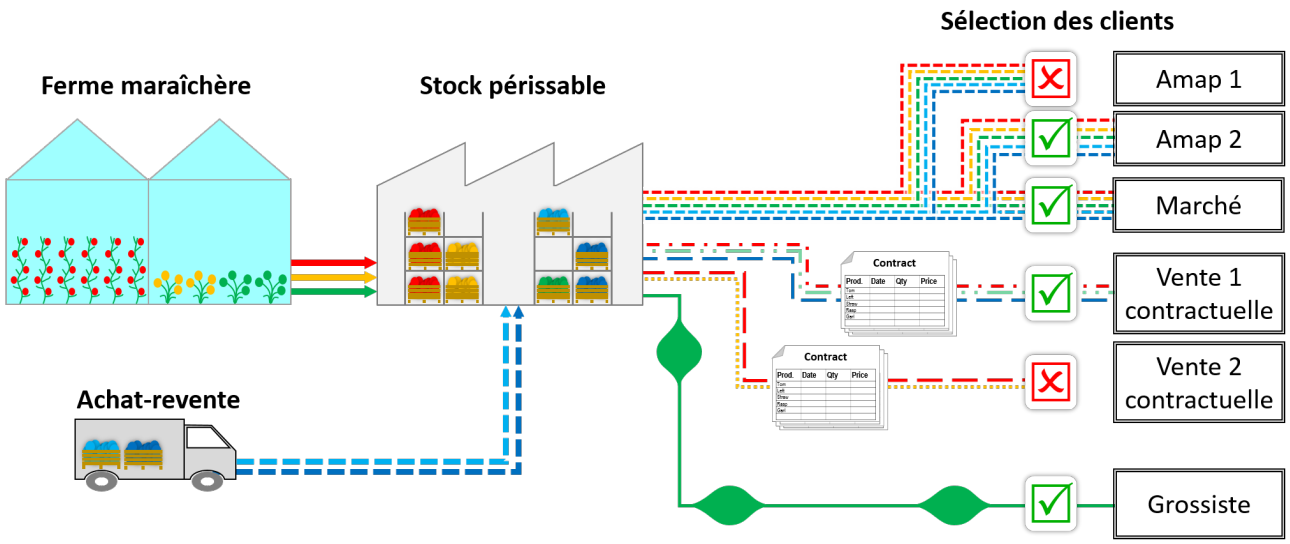


FIGURE 4.2 – *Le producteur doit choisir la combinaison de clients qui valorise au mieux sa production*

volumes minimaux à chaque livraison. Les clients demandent parfois des produits qui ne sont pas cultivés sur la ferme ou non disponibles à la période désirée. Dans ce cas, le maraîcher peut acheter une quantité $pr_{p,t}$ de produits auprès d'autres fermes pour répondre à la demande.

Nous présentons dans les sections suivantes un modèle en programmation linéaire mixte qui aide le producteur à choisir la meilleure combinaison de clients, à partir d'une production périssable donnée et des contraintes de main d'œuvre. Ce modèle d'aide à la décision oriente les choix du producteur au début d'une saison de culture. En fonction des marchés ciblés, le modèle peut être utilisé pour des décisions stratégiques ou tactiques. Nous ne considérons pas ici les incertitudes opérationnelles comme des changements de dates de livraison ou la gestion des tournées de véhicules. Ce modèle ne s'applique pas spécifiquement à l'agriculture urbaine francilienne. Il peut avoir un sens dans des contextes ruraux ou des contextes de pays en développement pour réfléchir à l'adéquation entre choix de production et choix de commercialisation, en adaptant les paramètres et les types de demandes.

2 Un état de l'art de la sélection des clients et des fournisseurs

Comme abordé dans les chapitres précédents, la gestion des chaînes alimentaires est rendue complexe par des longs temps de production, une durée de vie courte des produits périssables et une forte variabilité de la demande et des prix (Ahumada et Villalobos, 2009). Pour sécuriser son revenu, le producteur est incité à sélectionner des clients en mesure de conclure des contrats qui assurent des volumes et des prix profitables. La diversité des stratégies des producteurs pour vendre en circuits courts est analysée finement dans l'étude de de Biasi *et al.* (2015b) sur les filières courtes de proximité au sein du système alimentaire francilien.

Les problèmes de sélection des clients, tout comme les problèmes de sélection des fournisseurs, sont des problèmes multi-critères typiques, impliquant à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs (Singh, 2014; Aghdaie et Alimardani, 2015). De nombreux modèles ont été développés pour le

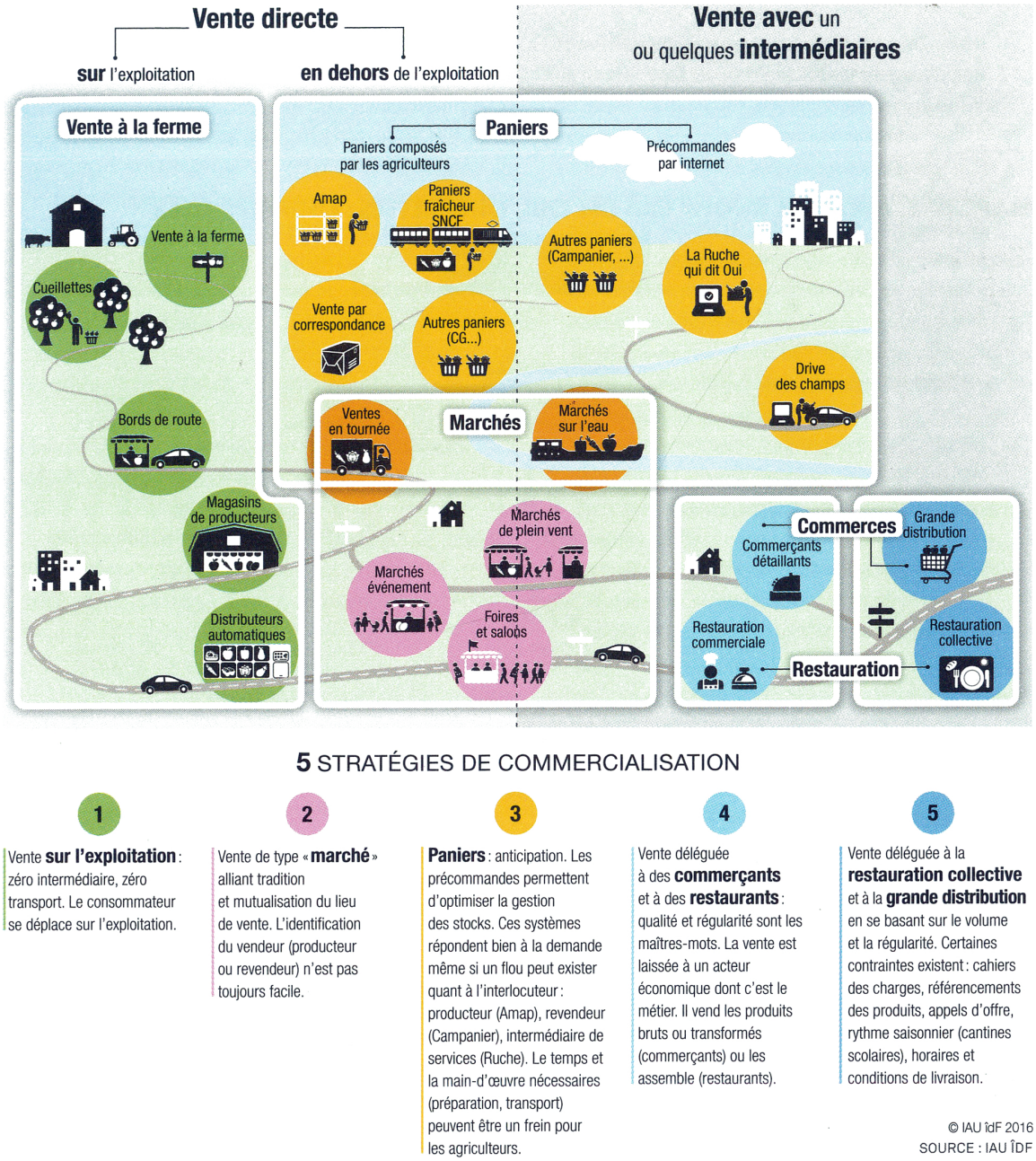


FIGURE 4.3 – *La diversité des filières courtes de proximité (source IAU IDF)*

problème de sélection des fournisseurs, utilisant différentes techniques pour trouver un compromis entre des critères conflictuels. Par exemple, Le Dain (2015) développe une méthode de sélection des fournisseurs fondée sur le cycle de vie de la collaboration, pour identifier les fournisseurs les plus à même de co-innover avec le donneur d'ordre. Dans leur revue de la littérature, De Boer *et al.* (2001) présentent différentes méthodes de sélection des fournisseurs :

— Les modèles linéaires de pondération donnent un poids, une valeur aux différents critères en jeu. Les fournisseurs sont classés selon le score obtenus sur l'ensemble des critères.
— La méthode du coût total de possession (*total cost of ownership*) consiste à évaluer tous les coûts quantifiables sur le cycle de vie des objets achetés. Les fournisseurs présentant le coût minimal sont sélectionnés.

— Les modèles statistiques se focalisent sur un critère principal et cherchent à prendre en compte les incertitudes, sur la demande ou les temps de production, pour sélectionner le fournisseur le plus robuste.
— Les modèles basés sur l'intelligence artificielle aident à sélectionner le fournisseur, à partir de processus d'apprentissages auprès d'acheteurs experts ou d'après des données historiques. Ces approches sont récentes et encore peu utilisées.
— Les modèles en programmation mathématique (programmation linéaire ou non-linéaire, programmation dynamique) maximisent une fonction objectif avec une prise en compte plus fine de l'impact des différents critères sur l'entreprise. Leur principal atout, d'après les auteurs, est qu'ils forcent les décideurs à expliciter leur fonction objectif et ainsi leurs règles de décision.

Nous nous focalisons sur les approches de programmation mathématique, bien adaptées pour prendre en compte plusieurs produits simultanément. Les modèles de décision multicritères (MCDM) fournissent un cadre théorique efficace pour la sélection des clients ou des fournisseurs. Shyur et Shih (2006) ont développé un modèle de décision multicritère en cinq étapes, en hybridant un processus d'analyse de réseau (*analytic network process*) et l'approche TOPSIS (*technique for order performance by similarity to ideal solution*). Les cinq étapes qu'ils définissent enrichissent les méthodes identifiées par De Boer *et al.* (2001) :

1. identifier les critères nécessaires à la sélection du fournisseur,
2. identifier les interdépendances entre critères,
3. définir ou obtenir le poids des différents critères,
4. évaluer les fournisseurs,
5. négocier du prix et des services auprès du fournisseur.

Wetzstein *et al.* (2016) distinguent deux types de problèmes de sélection du fournisseur. D'une part, les problèmes de simples d'approvisionnement, qui peuvent se résumer par une seule question : quel est le meilleur fournisseur ? D'autre part, les problèmes d'approvisionnement multiple dans lesquels les quantités commandées sont réparties auprès de différents fournisseurs selon leurs capacités et leurs contraintes. Le problème que nous étudions s'apparente à la seconde catégorie, puisque différents clients sont combinés pour écouler une production donnée, selon les évolutions de leurs demandes et de leurs prix au cours du temps et selon le coût de leur logistique.

La sélection des clients a reçu moins d'attention dans la littérature des systèmes de production et de la recherche opérationnelle, par rapport au problème de sélection des fournisseurs. De plus, le lien entre gestion des stocks et sélection du client est rarement considéré (De Boer *et al.*, 2001), malgré son importance, notamment lorsque l'on s'intéresse aux produits périssables. He *et al.* (2009) montrent que la combinaison de différentes catégories de clients permet d'exploiter les différentes temporalités des saisons de production et de commercialisation des différents marchés. Ahumada et Villalobos (2011a) développent un modèle tactique pour déterminer les surfaces de tomates et poivrons à cultiver et pour gérer le transport des produits aux entrepôts, centres de distribution ou directement aux clients finaux, en fonction de la demande de ces derniers. Les problèmes de sélection des clients sont liés à la segmentation du marché et sont principalement abordés dans la littérature du marketing, pour des problèmes comme le marketing direct (Kaishev *et al.*, 2013; Liao *et al.*, 2011).

La plupart des modèles s'intéressent à des problèmes où les produits sont gérés indépendamment (*single-deal*) ou en lots prédéfinis (*package*), comme présenté dans De Boer *et al.* (2001). Mais

les modèles qui traitent des interdépendances entre produits dans les demandes, ou de l'évolution de l'assortiment de produits au cours du temps, sont rares.

3 Le modèle de sélection des clients en programmation linéaire mixte

Nous nous intéressons à un maraîcher qui cultive une gamme $P^{\mathsf{f}} \subseteq P$ de produits périssables sur sa ferme. Il cherche à maximiser le revenu Rev de son exploitation. Les recettes (4.1) sont les profits issus de la vente sur les marchés de producteurs R^{fm} (*farmers' market* en anglais), dans les Amap R^{csa} (*community supported agriculture*), par les ventes contractualisées R^{cd} (*contract demand*) et via les grossistes R^{ws} (*wholesalers*) (4.1). Le coût de l'emploi de main d'œuvre (4.2) et les achats de produits à d'autres fermes (4.3) (*purchase-resale*) sont soustraits des profits pour obtenir le revenu. Les indices, les paramètres et les variables sont introduits au fur et à mesure de leur utilisation dans les contraintes du modèle.

$$\begin{aligned}
\max\ Rev = & R^{\mathsf{fm}} + R^{\mathsf{csa}} + R^{\mathsf{cd}} + R^{\mathsf{ws}} && (4.1)\\
& - \sum_t C_t^H - \sum_t h_t \cdot C_t^h && (4.2)\\
& - co^{\mathsf{pr}} && (4.3)
\end{aligned}$$

Le choix des clients est limité par deux capacités : la main d'œuvre et la production disponible. Pour ce modèle, nous considérons que la quantité de main d'œuvre présente et disponible sur la ferme est donnée H_t, elle est associée à un coût journalier C_t^H (voir table 4.1 pour les notations). Une main d'œuvre supplémentaire h_t peut être embauchée ponctuellement à un coût horaire plus important C_t^h. La main d'œuvre disponible totale doit être supérieure à la main d'œuvre nécessaire pour préparer, livrer et vendre les produits aux différents clients (contraintes 4.4). Nous ne prenons pas en compte le temps de production agricole dans ce modèle ; nous l'intégrons via la donnée H_t, qui traduit le temps de main d'œuvre de l'exploitation restant disponible pour la vente, une fois les temps de production et de management soustraits.

$$\begin{aligned}
H_t + h_t &\geq \gamma_t^{\mathsf{fm}} + \gamma_t^{\mathsf{csa}} + \gamma_t^{\mathsf{cd}} + \gamma_t^{\mathsf{ws}} + \gamma_t^{\mathsf{pr}}, && \forall t \in T && (4.4)\\
d_{p,t} &\leq \sum_{\beta \in [0, B_p]} i_{p,\beta,t}, && \forall p \in P, t \in T && (4.5)\\
\bar{d}_{p,t} &\leq \sum_{\beta \in [0, B_p]} \bar{i}_{p,\beta,t}, && \forall p \in P, t \in T && (4.6)\\
i_{p,\beta,t} &= Y_{p,t} + pr_{p,t}, && \forall p \in P, t \in T, \beta = 0 && (4.7)\\
i_{p,\beta,t} &= \bar{i}_{p,\beta,t} = 0, && \forall p \in P, t \in T, \beta > t && (4.8)\\
i_{p,\beta,t} &= \bar{i}_{p,\beta,t} = 0, && \forall p \in P, t \in T, \beta = B_p && (4.9)\\
\sum_{p \in P^{\mathsf{rs}}, t \in T} pr_{p,t} &\leq 0,3 * \sum_{p \in P, t \in T} d_{p,t} && && (4.10)
\end{aligned}$$

Ensembles	
$p \in P$	ensemble des produits proposés aux clients $P = P^{\mathsf{f}} \cup P^{\mathsf{rs}}$
$P^{\mathsf{f}} \subseteq P$	sous-ensemble des produits cultivés sur la ferme
$P^{\mathsf{rs}} \subseteq P$	sous-ensemble des produits disponibles dans les fermes environnantes
$t \in T$	périodes de planification
$c \in C^m$	clients du marché $m \in \{\mathsf{fm}, \mathsf{csa}, \mathsf{cd}, \mathsf{ws}\}$
Paramètres généraux	
$Y_{p,t}$	quantité de produit p à maturité à la période t (en kg)
$\beta \in [0, B_p]$	durée de conservation des produits en chambre froide
$L_{p,\beta}$	fonction de perte du produit p après β périodes passées en chambre froide
H_t	heures de main d'œuvre permanente ou saisonnière déjà disponibles sur la ferme
C_t^H	coût de la main d'œuvre permanente ou saisonnière déjà disponible sur la ferme
C_t^h	coût de la main d'œuvre intérimaire de vente
Variables sur la ferme et ses ressources	
h_t	heures de travail intérimaire engagées en période t
$i_{p,\beta,t}$	quantité disponible de produits commercialisables d'âge β (en kg)
$d_{p,t}$	quantité livrée en produits commercialisables à la période t (en kg)
$\bar{i}_{p,\beta,t}$	quantité disponible en produits perdus d'âge β (en kg)
$\bar{d}_{p,t}$	quantité de produits perdus retirés du stock à la période t (en kg)
co^{pr}	coût de l'activité d'achat-revente (achat de produits + logistique)

TABLE 4.1 – *Paramètres et variables du modèle concernant les produits de la ferme et ses ressources*

La ferme produit une quantité $Y_{p,t}$ de produits p à chaque période t. La somme des quantités livrées aux différents clients $d_{p,t}$ ne peut excéder les quantités disponibles $i_{p,\beta,t}$ dans la chambre froide à chaque période t (cont. 4.5). Les quantités jetées de produits perdus $\bar{d}_{p,t}$ respectent des contraintes similaires (cont. 4.6). Les produits issus de la ferme $Y_{p,t}, p \in P^{\mathsf{f}}$ et d'autres fermes $pr_{p,t}, p' \in P^{\mathsf{rs}}$ entrent dans le stock en chambre froide juste après récolte, à maturité, avec un indice temporel $\beta = 0$ (cont. 4.7). Aucun stock initial n'est présent, il ne peut pas y avoir un produit stocké dont l'âge β est supérieur à la période t de l'horizon de planification (cont. 4.8). Nous imposons une durée maximale de stockage B_p, du fait de la périssabilité des produits que nous étudions (voir la modélisation de la périssabilité présentée pour le modèle de planification tactique à la page 49). Cette durée maximale s'applique aux produits commercialisables comme aux produits perdus (cont. 4.9).

$$i_{p,\beta+1,t+1} \leq \left(1 - L_{p,\beta}\right) \cdot \left(i_{p,\beta,t} - d_{p,\beta,t}\right) \qquad \forall p \in P, t < t_{max}, \beta \in 0..B_p - 1 \tag{4.11}$$

$$\bar{i}_{p,\beta+1,t+1} = \left(\bar{i}_{p,\beta,t} - \bar{d}_{p,\beta,t}\right) + \left(i_{p,\beta,t} - d_{p,\beta,t}\right) \cdot L_{p,\beta} \qquad \forall p \in P, t < t_{max}, \beta \in 0..B_p - 1 \tag{4.12}$$

$$d_{p,t} = \sum_{c \in C^{\mathsf{fm}}} \omega_{c,p,t}^{\mathsf{fm}} + \sum_{c \in C^{\mathsf{csa}}} \omega_{c,p,t}^{\mathsf{csa}} * K_c^{\mathsf{csa}} + \sum_{c \in C^{\mathsf{cd}}} \omega_{c,p,t}^{\mathsf{cd}} + \omega_{c,p,t}^{\mathsf{ws}}, \qquad \forall p \in P, \beta, t \tag{4.13}$$

Comme dans le chapitre 2, nous définissons des contraintes de flux pour gérer la périssabilité des produits. Le stock de produits commercialisables est atténué par la fonction de perte $L_{p,\beta-1}$ selon l'âge des produits β stockés (cont. 4.11, 4.12). La quantité livrée $d_{p,\beta,t}$ à chaque période est la somme des quantités livrées aux clients de toutes les catégories (cont. 4.13). La règlementation française limite la part de produits issus de l'achat-revente à 30% des recettes tirées de l'activité agricole (Code général des impôts - Article 75). Pour simplifier, nous considérons ici que l'achat-revente peut représenter au maximum 30% des volumes en produits, les prix d'achat des produits en achat-revente étant proche des prix de vente aux clients de la ferme (cont. 4.10).

Dans les sections suivantes, nous définissons des contraintes plus spécifiques pour chacun des quatre types de clients étudiés.

3.1 La vente aux marchés de producteurs

Les marchés de producteurs (abrégés fm pour *farmers' markets* en anglais) permettent de vendre les produits de la ferme directement aux clients, toutes les semaines ou tous les mois. Les produits ne peuvent être livrés qu'aux jours de marché prédéfinis (cont. 4.14) pendant la saison d'ouverture du marché. En effet, les marchés peuvent avoir lieu toute l'année, du printemps à l'automne ou seulement en été sur les lieux touristiques. La donnée binaire $Av^{\mathsf{fm}}_{c,t}$ définit pour chaque marché c s'il est ouvert à la période t. Le producteur propose une diversité minimale de produits Δ^{fm} pour attirer ses consommateurs (cont. 4.15).

La quantité de produits livrée $\omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t}$ doit s'inscrire dans une gamme $[w^{\mathsf{fm}}_{min,p}, w^{\mathsf{fm}}_{max,p}]$ de poids (cont. 4.16). Ces contraintes permettent d'assurer que l'étal est bien équilibré, en évitant, par exemple, que 90% du volume proposé soit des pommes de terres. Le poids total d'une livraison, tous produits cumulés, doit aussi s'inscrire dans une gamme de poids $[W^{\mathsf{fm}}_{min,p}, W^{\mathsf{fm}}_{max,p}]$, pour tenir compte de la capacité du véhicule de livraison (cont. 4.17,4.18). Dans ce modèle, nous considérons un unique type de véhicule de livraison, dans le cas d'un réseau logistique en étoile, le véhicule revenant toujours à la ferme entre deux livraisons. Les coûts de transports sont donc fixes pour une livraison et nous ne modélisons pas les tournées de livraison. Le profit du marché de producteurs est composé des recettes des ventes, auxquelles sont soustraits la détérioration des produits et les coûts de transport aller-retour pour le marché et le coût de l'emplacement (cont. 4.19). Le temps γ^{fm}_t est le temps de travail nécessaire pour préparer et livrer les produits du marché c et vendre aux clients (cont. 4.20).

$$\nu^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \leq Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \qquad \forall c \in C^{\mathsf{fm}}, p \in P, t \in T \tag{4.14}$$

$$\sum_p \nu^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \geq Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \Delta^{\mathsf{fm}} \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \qquad \forall c \in C^{\mathsf{fm}}, t \tag{4.15}$$

$$w^{\mathsf{fm}}_{min,p} \cdot \nu^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \leq \omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \leq w^{\mathsf{fm}}_{max,p} \cdot \nu^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{fm}}, p \in P, t \in T \tag{4.16}$$

$$\sum_p \omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \geq W^{\mathsf{fm}}_{min,p} \cdot Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \qquad \forall c \in C^{\mathsf{fm}}, t \in T \tag{4.17}$$

$$\sum_p \omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} \leq W^{\mathsf{fm}}_{max,p} \cdot Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \qquad \forall c \in C^{\mathsf{fm}}, t \in T \tag{4.18}$$

$$R^{\mathsf{fm}} = \sum_{c,p,t} \Pi^{\mathsf{fm}}_{p,t} \cdot \left(1 - L^{\mathsf{fm}}_c\right) \cdot \omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t} - \sum_{c,t} Ct^{\mathsf{fm}}_c \cdot Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \tag{4.19}$$

$$\gamma^{\mathsf{fm}}_t = \sum_c Av^{\mathsf{fm}}_{c,t} \cdot \Gamma^{\mathsf{fm}}_c \cdot \lambda^{\mathsf{fm}}_c \qquad \forall t \in T \tag{4.20}$$

Paramètres des marchés de producteurs	
$Av^{\mathsf{fm}}_{c,t}$	Période de disponibilité / d'ouverture du marché (jours de marché dans l'année)
$w^{\mathsf{fm}}_{min,p}$	quantité minimale de produit p que le producteur doit proposer pour vendre ce produit sur le marché (en kg)
$w^{\mathsf{fm}}_{max,p}$	quantité maximale de produit p que le producteur peut proposer pour vendre ce produit sur le marché (en kg)
$\Pi^{\mathsf{fm}}_{p,t}$	prix de vente du produit p sur le marché à la période t
L^{fm}_c	pertes sur le marché (% des volumes qui sont invendus et abimés à la fin du marché)
Δ^{fm}	nombre minimal de produits différents sur l'étal du marché
Ct^{fm}_c	coût du transport et de la place de marché à chaque jour d'ouverture du marché c
Γ^{fm}_c	temps nécessaire pour livrer et vendre au marché c
Variables concernant les marchés de producteurs	
λ^{fm}_c	booléen, $= 1$ si le marché c est choisi comme client
$\nu^{\mathsf{fm}}_{c,p,t}$	booléen, $= 1$ si le produit p est vendu sur le marché c à la période t
$\omega^{\mathsf{fm}}_{c,p,t}$	quantité de produit p livré au marché c à la période t (en kg)
γ^{fm}_t	temps nécessaire à la livraison et à la vente sur l'ensemble des marchés de producteurs à la période t

TABLE 4.2 – *Paramètres et variables du modèle concernant les marchés de producteurs*

3.2 La vente de paniers en Amap

Les Associations pour le maintien d'une agriculture paysanne, appelée Amap (*Community supported agriculture* ou *CSA* en anglais) sont un mode de vente directe dans lequel les clients achètent par avance une part de la récolte de la ferme. La vente en Amap et sur les marchés de producteurs ont de nombreuses contraintes en commun (i.e. eq. 4.14-4.18, 4.20).

Le producteur doit livrer un jour fixe pendant la période d'ouverture du client (cont. 4.21), à un point de collecte, K^{csa}_c paniers contenant un assortiment de fruits et légumes de saison, avec un minimum de diversité Δ^{csa} (cont. 4.22). Les contraintes 4.13 impose de livrer les K^{csa}_c paniers si l'Amap est sélectionnée comme débouché. La donnée binaire $Av^{\mathsf{csa}}_{c,t}$ définit pour chaque Amap c si elle doit être livrée à la période t. Les produits doivent être dans des proportions raisonnables et équilibrées (cont. 4.23). Par contrat, le poids d'un panier de produits doit appartenir à une gamme

de poids $[W^{\text{csa}}_{min,p}, W^{\text{csa}}_{max,p}]$ (cont. 4.24, 4.25) et le prix cumulé des produits doit être supérieur ou égal à un prix cible $\Psi^{\text{csa}}_{c,p,t}$ (cont. 4.26). Le revenu des clients Amap correspond aux ventes de K^{csa}_{c} paniers de produits, auxquelles sont soustraits les coûts de transport Ct^{csa}_{c} (cont. 4.27). Le temps γ^{csa}_{t} est le temps nécessaire à la préparation, la livraison et la vente aux clients Amap (cont. 4.28). La formulation du modèle Amap permet de prendre en compte d'autres modes de commercialisation sous forme d'assortiments variables de produits : paniers SNCF, services de livraison de fruits au bureau, livraison de paniers en point relai, etc.

FIGURE 4.4 – *Vente de paniers en Amap, livraison au bureau et Paniers Fraicheur SNCF (sources amap-idf.org, lesvergersdegally.com et transilien.com)*

Paramètres des Amap	
$Av^{\text{csa}}_{c,t}$	période de disponibilité / ouverture de l'Amap (jours de livraison dans l'année)
$w^{\text{csa}}_{min\ c,p}$	quantité minimale de produit p que le producteur doit proposer pour inclure ce produit dans un panier (en kg)
$w^{\text{csa}}_{max\ c,p}$	quantité maximale de produit p que le producteur peut proposer pour inclure ce produit dans un panier (en kg)
$W^{\text{csa}}_{min\ c}$	poids minimal d'un panier (en kg)
$W^{\text{csa}}_{max\ c}$	poids maximal d'un panier (en kg)
$\Pi^{\text{csa}}_{p,t}$	prix de vente du produit p dans les circuits Amap
Ψ^{csa}_{c}	prix de vente d'un panier de légumes à l'Amap c
$K^{\text{csa}}_{c,t}$	nombre de paniers à livrer à la période t à l'Amap c
Δ^{csa}	nombre minimal de produits dans un panier
Ct^{csa}_{c}	coût du transport pour livrer l'Amap c
Γ^{csa}_{c}	temps nécessaire pour livrer et vendre à l'Amap c
Variables concernant les Amap	
λ^{csa}_{c}	booléen $= 1$ si le client Amap c est ouvert
$\nu^{\text{csa}}_{c,p,t}$	booléen, $= 1$ si le produit p est inclu dans les paniers pour le client c à la période t
$\omega^{\text{csa}}_{c,p,t}$	quantité de produit p livrée à la période t au client c (en kg)
γ^{csa}_{t}	temps nécessaire à la livraison et à la vente des produits aux clients Amap à la période t

TABLE 4.3 – *Paramètres et variables du modèle concernant les Amap*

$$\nu^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \leq Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, p \in P, t \in T \qquad (4.21)$$

$$\sum_{p} \nu^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \geq Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \Delta^{\mathsf{csa}} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, t \in T \qquad (4.22)$$

$$w^{\mathsf{csa}}_{min,p} \cdot \nu^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \leq \omega^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \leq w^{\mathsf{csa}}_{max,p} \cdot \nu^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, p \in P, t \in T \qquad (4.23)$$

$$\sum_{p} \omega^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \geq W^{\mathsf{csa}}_{min,p} \cdot Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, t \in T \qquad (4.24)$$

$$\sum_{p} \omega^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \leq W^{\mathsf{csa}}_{max,p} \cdot Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, t \in T \qquad (4.25)$$

$$\sum_{p \in P} \Pi^{\mathsf{csa}}_{p,t} \cdot \omega^{\mathsf{csa}}_{c,p,t} \geq Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \Psi^{\mathsf{csa}}_{c} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{csa}}, t \in T \qquad (4.26)$$

$$R^{\mathsf{csa}} = \sum_{c,p,t} \Psi^{\mathsf{csa}}_{c} \cdot K^{\mathsf{csa}}_{c} \cdot Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} - \sum_{c,t} Ct^{\mathsf{csa}}_{c} \cdot Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad (4.27)$$

$$\gamma^{\mathsf{csa}}_{t} = \sum_{c} Av^{\mathsf{csa}}_{c,t} \cdot \Gamma^{\mathsf{csa}}_{c} \cdot \lambda^{\mathsf{csa}}_{c} \qquad \forall t \in T \qquad (4.28)$$

3.3 La vente contractualisée à des entreprises

Des clients comme la restauration collective ou privée peuvent anticiper leurs demandes et lancer des appels d'offres pour sélectionner les entreprises qui leur fourniront des lots prédéfinis de produits sur l'année ou les années à venir. Obtenir un tel contrat d'approvisionnement peut être une opportunité pour le maraîcher en lui permettant d'anticiper son planning de production et de distribution, ainsi que ses flux de trésorerie sur du temps long. Ces clients sont notés cd pour *contract demand* dans la suite. Les clients définissent des demandes spécifiques $D^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ et des prix $\Pi^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ pour chaque produit p à chaque période t.

Pour fournir ce type de clients, le producteur doit pouvoir s'engager à fournir tous les produits demandés sur la toute la durée du contrat (cont. 4.29). Certains clients peuvent laisser une certaine marge de manœuvre au producteur en définissant une pénalité $\Pi^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ pour les quantités $\delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ qui ne leur sont pas livrées et un prix $\Pi^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ pour les quantités $\delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ excédant la demande. $\delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ et $\delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ sont des quantités positives (cont. 4.30). Chaque livraison est associée à des coûts fixes liés à la variable booléenne de livraison $\iota^{\mathsf{cd}}_{c,t}$ par les contraintes 4.31, M^{cd} étant un majorant de $\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$. Le revenu se compose des ventes de produits $\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$ moins les coûts transports Ct^{cd}_{c} (cont. 4.33). Le temps de travail γ^{cd}_{t} est composée des temps fixes pour chaque livraison pour chaque client $\Gamma^{\mathsf{cd}}_{F\ c}$ et des temps variables $\Gamma^{\mathsf{cd}}_{V\ c}$ dépendant des quantités à préparer, charger et décharger (cont. 4.34).

$$\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} = D^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} + \delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t} - \delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{cd}}, p \in P, t \in T \qquad (4.29)$$

$$\delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t} \geq 0, \delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t} \geq 0 \qquad \forall c \in C^{\mathsf{cd}}, p \in P, t \in T \qquad (4.30)$$

$$\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} \leq M^{\mathsf{cd}} \cdot D^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot \iota^{\mathsf{cd}}_{c,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{cd}}, p \in P, t \in T \qquad (4.31)$$

$$\iota^{\mathsf{cd}}_{c,t} \leq \lambda^{\mathsf{cd}}_{c} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{cd}}, p \in P, t \in T \qquad (4.32)$$

$$R^{\mathsf{cd}} = \sum_{c,p,t} \big(\Pi^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot D^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot \lambda^{\mathsf{cd}}_{c} + \Pi^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot \delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t} - \Pi^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot \delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}\big) - \sum_{c,t} Ct^{\mathsf{cd}}_{c} \cdot \iota^{\mathsf{cd}}_{c,t} \tag{4.33}$$

$$\gamma^{\mathsf{cd}}_{t} = \sum_{c \in C^{\mathsf{cd}}} \big(\iota^{\mathsf{cd}}_{c,t} \cdot \Gamma^{\mathsf{cd}}_{F\ c} + \omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t} \cdot \Gamma^{\mathsf{cd}}_{V\ c}\big) \qquad \forall t \in T \tag{4.34}$$

Paramètres des demandes contractuelles	
$\Pi^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	prix de vente du produit p au client c à la période t
$\Pi^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	prix de vente des quantités de produits livrées en excédent
$\Pi^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	pénalité pour les quantités de produits manquant à la commande
$D^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	quantité de produit p à fournir au client c à la période t (en kg)
M^{cd}	constante majorant $\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$
Ct^{cd}_{c}	coût du transport pour livrer le client c
$\Gamma^{\mathsf{cd}}_{F\ c}$	temps fixe pour livrer le client c
$\Gamma^{\mathsf{cd}}_{V\ c}$	temps variable pour livrer une unité de produit au client c
Variables de demandes contractuelles	
$\lambda^{\mathsf{cd}}_{c}$	booléen $= 1$ si le client est sélectionné
$\iota^{\mathsf{cd}}_{c,t}$	booléen $= 1$ si une livraison a lieu à la période t
$\omega^{\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	quantité de produit p livrée à la période t au client c (en kg)
$\delta^{+\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	quantité de produit p livrée en plus de la demande (en kg)
$\delta^{-\mathsf{cd}}_{c,p,t}$	quantité de produit p manquant à la commande (en kg)
γ^{cd}_{t}	temps nécessaire à la livraison et au service des clients contractuels à la période t

TABLE 4.4 – *Paramètres et variables du modèle concernant les demandes contractuelles*

3.4 La vente à des grossistes

Les grossistes (abrégés ws pour *wholesalers* en anglais) peuvent accepter des volumes importants de produits mais prennent une marge dans le négoce de produits. En conséquence, leurs prix d'achat $\Pi^{\mathsf{ws}}_{c,p,t}$ au producteur sont plus faibles que ceux pratiqués par les clients précédents. Le producteur peut être intéressé par vendre à des grossistes quand sa production dépasse la demande des autres types de clients, quand sa main d'œuvre de livraison et de vente est limitée ou quand il souhaite diversifier ses débouchés. Nous considérons ici que les demandes des grossistes sont illimitées, les volumes étant très supérieurs aux capacités de production des fermes que nous étudions. Chaque livraison engendre des coûts fixes (cont. 4.35) et des temps de livraison (cont. 4.38), liés à la variable booléenne $\iota^{\mathsf{ws}}_{c,t}$. Il est nécessaire d'atteindre un volume de produit p minimal $w^{\mathsf{ws}}_{min,c,p}$ pour vendre aux grossistes (cont. 4.36). Les quantités livrées $\sum_p \omega^{\mathsf{ws}}_{c,p,t}$ ne peuvent excéder la capacité du véhicule du producteur $W^{\mathsf{ws}}_{max,c}$ (cont. 4.35).

$$\sum_p \omega^{\mathsf{ws}}_{c,p,t} \leq W^{\mathsf{ws}}_{max,c} \cdot \iota^{\mathsf{ws}}_{c,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{ws}}, p \in P, t \in T \tag{4.35}$$

$$w^{\mathsf{ws}}_{min,c,p} \cdot \iota^{\mathsf{ws}}_{c,t} \leq \omega^{\mathsf{ws}}_{c,p,t} \qquad \forall c \in C^{\mathsf{ws}}, p \in P, t \in T \tag{4.36}$$

$$R^{\mathsf{ws}} = \sum_{c,p,t} \Pi^{\mathsf{ws}}_{c,p,t} \cdot \omega^{\mathsf{ws}}_{c,p,t} - \sum_{c,t} Ct^{\mathsf{ws}}_c \cdot \iota^{\mathsf{ws}}_{c,t} \tag{4.37}$$

$$\gamma^{\mathsf{ws}}_t = \sum_{c \in C^{\mathsf{ws}}} \Gamma^{\mathsf{ws}}_c \cdot \iota^{\mathsf{ws}}_{c,t} \qquad \forall t \in T \tag{4.38}$$

Paramètres des grossistes	
$w^{\mathsf{ws}}_{min,c,p}$	poids minimal d'un lot de produit p (en kg)
$W^{\mathsf{ws}}_{max,c}$	poids maximal autorisé en une livraison, tous produits cumulés (en kg)
$\Pi^{\mathsf{ws}}_{c,p,t}$	prix de vente du produit p à la période t
Ct^{ws}_c	coût du transport pour livrer les produits
Γ^{ws}_c	temps nécessaire à la livraison des produits
Variables de décision concernant les grossistes	
$\iota^{\mathsf{ws}}_{c,t}$	booléen $= 1$ si une livraison a lieu en période t
$\omega^{\mathsf{ws}}_{c,p,t}$	quantité de produit p livrée au client c en période t (en kg)
γ^{ws}_t	temps nécessaire à la livraison des clients grossistes à la période t

TABLE 4.5 – *Paramètres et variables du modèle concernant les grossistes*

3.5 L'achat-revente de produits d'autres fermes

Certains produits commandés par les clients peuvent ne pas être disponibles sur la ferme aux périodes où ils sont demandés, soit que le maraîcher ne cultive qu'une gamme limitée de produits, soit que le produit n'est pas mûr à la période demandée en fonction des itinéraires techniques pratiqués. Pour palier ce manque, le producteur peut se fournir auprès d'autres fermes. Dans la version du modèle que nous présentons, nous considérons un unique fournisseur en produits frais, avec une production illimitée. Chaque livraison du fournisseur engendre un coût de livraison (cont. 4.39). Les quantités livrées $\sum_p pr_{p,t}$ ne peuvent excéder la capacité du véhicule $W^{\mathsf{ws}}_{max,c}$ (cont. 4.40). Le coût de l'achat-revente sur l'année inclut l'achat des produits au prix $\Pi^{\mathsf{pr}}_{p,t}$ et les coûts de livraison Ct^{pr} (cont. 4.41). Le fournisseur gère la préparation du produit et sa livraison, le producteur ne consacre du temps que pour recevoir les produits et pour les stocker (cont. 4.42).

$$pr_{p,t} \leq M_t \cdot \iota^{\mathsf{pr}_t} \qquad \forall p \in P, t \in T \tag{4.39}$$

$$\sum_p pr_{p,t} \leq W^{\mathsf{pr}}_{max} \cdot \iota^{\mathsf{pr}}_t \qquad \forall t \in T \tag{4.40}$$

$$co^{\mathsf{pr}} = \sum_{p,t} \Pi^{\mathsf{pr}}_{p,t} \cdot pr_{p,t} + \sum_t Ct^{\mathsf{pr}} \cdot \iota^{\mathsf{pr}}_t \tag{4.41}$$

$$\gamma^{\mathsf{pr}}_t = \Gamma^{\mathsf{pr}} \cdot \iota^{\mathsf{pr}}_t \qquad \forall t \in T \tag{4.42}$$

Paramètres de l'achat-revente	
W^{pr}_{max}	poids maximal d'une livraison, tous produits cumulés (en kg)
M_t	constante majorant de $pr_{p,t}$
$\Pi^{\mathsf{pr}}_{p,t}$	prix d'achat du produit p à la période t
Ct^{pr}	coût du transport facturé à la ferme
Γ^{pr}	temps nécessaire à accueillir la livraison
Variables liées à l'achat-revente	
$pr_{p,t}$	quantité de produit p livrée à la ferme à la période t (en kg)
ι^{pr}_t	booléen $= 1$ si une livraison a lieu à la période t
co^{pr}	coût de l'activité d'achat-revente
γ^{pr}_t	temps consacré à la réception des produits à la période t

TABLE 4.6 – *Paramètres et variables du modèle concernant l'achat-revente*

4 Analyse théorique de la complexité du problème

Afin de pouvoir appliquer des méthodes d'optimisation trouvées dans la littérature, nous devons étudier la structure du problème en détail. La formulation actuelle du programme linéaire mixte génère $\mathcal{O}(|P||T|^2 + |C||P||T|)$ variables, et le même ordre de grandeur pour les contraintes, avec $|P|$ le nombre de produits, $|T|$ le nombre de périodes et $|C|$ le nombre de clients. $\mathcal{O}(|P||T|^2)$ correspond à la gestion des stocks périssables, avec des variables telles que $i_{p,\beta,t}$. $\mathcal{O}(|C||P||T|)$ correspond aux variables de livraison des clients telles que $\omega^{\mathsf{csa}}_{c,p,t}$.

Pour approcher la complexité théorique de notre problème, nous pouvons identifier plusieurs sous-problèmes.

Vente à des grossistes avec capacité de production : Quand les seuls clients considérés sont les grossistes et que l'achat-revente n'est pas autorisé, le programme linéaire mixte revient à résoudre un problème de dimensionnement de lot avec capacité et coûts et temps fixes (*capacitated lot-sizing model with setups times and costs*) [1]. Les clients sont livrés à une date donnée par la main d'œuvre de la ferme H_t ou de la main d'œuvre supplémentaire employée h_t au besoin. Les capacités et les coûts fixes rendent ce problème NP-difficile dans la plupart des cas, comme montré dans Hsu (1983).

Vente aux clients contractuels avec capacité de production : Lorsque les seuls clients pris en compte sont des clients de type demande contractuelle et que l'achat-revente n'est pas permis, le problème peut être considéré comme un problème de sac à dos multidimensionnel avec coûts fixes (*multidimensional knapsack problem with setups*). Chaque contrat à long terme avec un client c est un objet du problème de sac à dos, objet qui consomme une certaine quantité des ressources disponibles, la main d'œuvre et la production, à chaque période. Le problème d'optimisation consiste à sélectionner l'ensemble d'objets qui maximise le revenu, en ciblant des prix et des volumes intéressants tout en limitant les pertes et les invendus. Parmi les deux dimensions du problème de sac à dos, la production est fixe et la main d'œuvre peut être augmentée en engageant une main d'œuvre ponctuelle h_t à la période t. Le problème de sac à dos multidimensionnel est une variante plus complexe du problème de sac à dos binaire classique, connu pour être NP-difficile (Karp, 1972; Osorio *et al.*, 2002).

1. Voir le chapitre 2 pour la présentation de ces problèmes théoriques : sac-à-dos page 59 et dimensionnement de lot page 61.

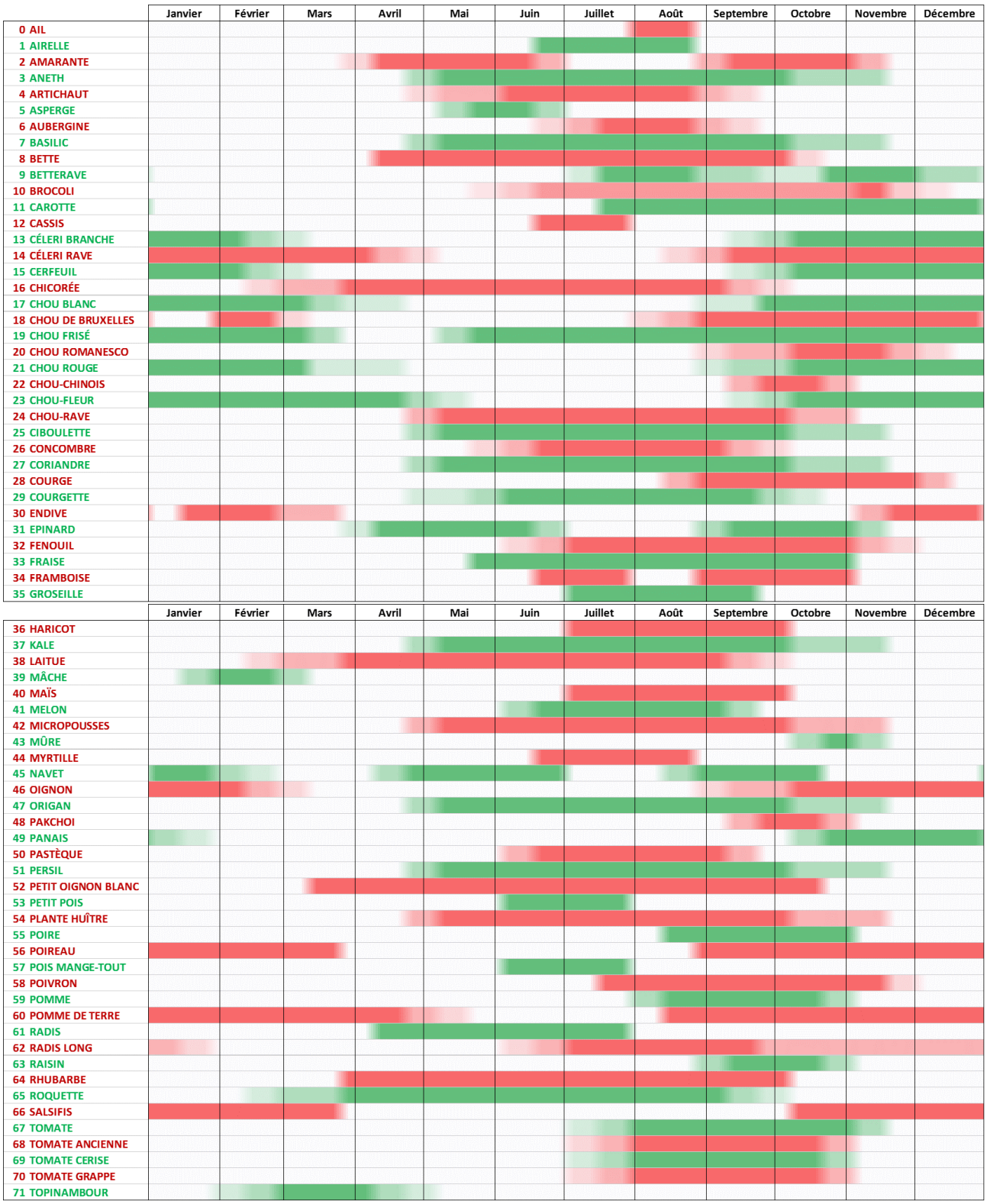


FIGURE 4.5 – *Période de production des fruits et légumes étudiés*

Vente en Amap et marchés de producteurs avec capacité de production : Lorsque l'on considère uniquement ces catégories de clients, le problème se concentre sur la fourniture de la diversité de produits minimale demandée par les clients à chaque période, en respectant des poids et des prix cibles, et en présence de coûts fixes. Ce programme inclut un grand nombre de variables binaires pour exprimer la présence d'un produit dans une livraison. Ce sous-problème peut être vu comme une extension du problème NP-difficile de dimensionnement de lot multiproduits avec capacités et coûts fixes, couplé à un problème de sac-à-dos. Ce dernier consiste à sélectionner les produits qui composeront chaque semaine les livraisons en respectant des seuils de volumes, ainsi qu'un poids cible et un prix cible cumulés pour l'ensemble des produits.

Combinaison des marchés avec achat-revente : En combinant la diversité de clients et en permettant au producteur de s'approvisionner hors de sa ferme en produits, nous relâchons partiellement des contraintes de capacité. Le modèle peut être vu comme la combinaison de problèmes de sac à dos binaires multidimensionnels et de différents niveaux de modèles de dimensionnements de lots avec capacité et coûts fixes. Production, achat-revente, gestion de l'inventaire et sélection du client se retrouvent intimement liés dans un problème très combinatoire et théoriquement difficile à résoudre.

Dans les parties suivantes, nous présentons des résultats expérimentaux.

5 Résultats numériques et analyse des performances du programme linéaire mixte

5.1 Cas d'études et données

Nous proposons ici un cas d'études réaliste pour tester le programme linaire mixte, le temps de la thèse n'ayant pas permis de le valider sur le cas d'une ferme réelle. Nous extrapolons le contexte et les données du site *Les Fermes en Villes*, ferme urbaine expérimentale exploitée par les *Fermes de Gally*, et présentée au chapitre 2.

Considérons une ferme qui produit une grande variété de produits en région parisienne, selon un calendrier cultural traditionnel de culture maraîchère combinant culture de plein champ et culture sous abri (voir tableau 4.5 page 120). En complément de la gamme produite, le maraîcher peut acheter des produits à d'autres fermes.

La ferme peut vendre ses produits à différents clients. En premier lieu, elle peut vendre sa production à deux grossistes en fruits et légumes. Le premier d'entre eux est un grossiste spécialisé en produits frais de qualité à destination des chefs parisiens. Il n'accepte pas tous les types de produits et peut absorber des quantités limitées de produits. Sa base logistique se situe sur le Marché International de Rungis, à 30 km de la ferme. Le second grossiste est un grossiste non orienté vers la qualité. Basé à une vingtaine de kilomètres de la ferme, il peut absorber de gros volumes de produits à faible prix. Les prix de ventes sont issus des Mercuriales (FranceAgriMer, 2017), dans la catégorie *Légumes France Détail GMS*, sur la période du 01-04-2016 au 31-03-2017. Les distances aux différents clients sont représentées sur la figure 4.6.

Le producteur peut cibler quatre marchés de producteurs, en considérant que des places de producteurs sont disponibles sur ces marchés. Les deux premiers sont des petits marchés de proximité.

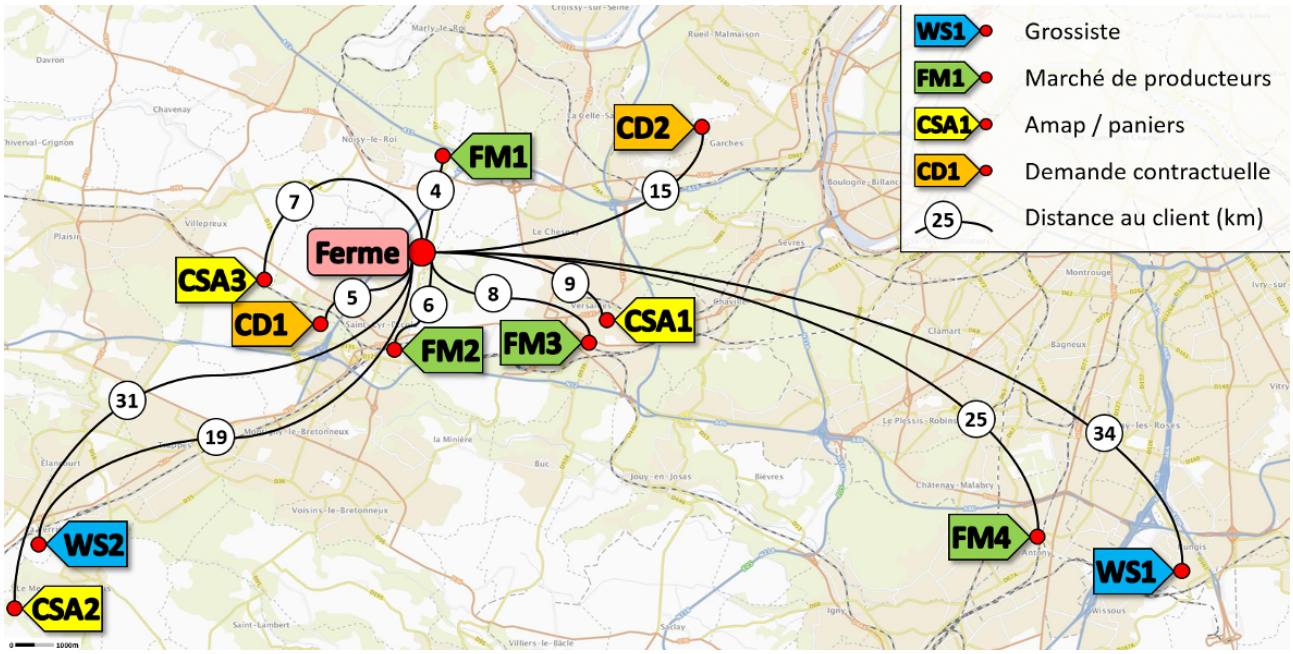


FIGURE 4.6 – *Localisation des différents clients par rapport au siège d'exploitation dans le cas d'étude (Fonds de carte Geoportail)*

Les suivants de gros marchés, plus rémunérateurs, mais demandant un plus grand investissement en temps et une production plus fournie. Les données sont tirées de *jourdemarche.fr*, *paris.fr* et Allain et Bardoulat (2014). Pour tous ces marchés, nous définissons une "intensité de marché" évoluant au cours de l'année : un même marché attire plus de monde en plein été qu'en hiver.

1. Marché de la petite commune voisine de Bailly, le samedi de 8h à 13h.
2. Marché de la ville de St-Cyr-l'Ecole, qui a lieu le mercredi et le samedi de 8h à 13h.
3. Marché du Carré Notre Dame à Versailles, les mardi, vendredi et dimanche de 7h à 14h.
4. Marché d'Antony plus éloigné, en petite couronne au sud de Paris, à proximité d'une gare, ouvert le mercredi et le samedi de 8h à 13h.

Le producteur a l'opportunité de vendre dans différentes Amap. Les données de ces Amap sont issues de leurs sites respectifs, répertoriés sur le site www.amap-idf.org.

1. Amap de Versailles Mique : partage des paniers entre 100 adhérents le mercredi de 19h à 20h, 46 semaines par an de fin avril à mi mars. Le producteur s'engage à fournir au moins 6 produits par panier de 3,5 kg, vendu 11,5 €.
2. Amap de Rambouillet : partage des 50 paniers le jeudi de 19h à 20h toute l'année, sauf les 2 dernières semaines de décembre et le mois d'avril. Les paniers sont vendus 15€, avec 6 légumes différents à chaque paniers et au moins 25 légumes différents sur la saison.
3. Amap de Bois d'Arcy : 30 paniers à 16 € à livrer le mercredi de 18h15 à 19h30, 45 semaines par an. Le panier contient au minimum 5 légumes différents.

Le producteur peut aussi viser deux clients de type demande contractuelle, à savoir un lycée de 850 élèves à St-Cyr-l'Ecole et une entreprise de restauration de banlieue parisienne. Le lycée ne demande des produits que pendant les périodes scolaires. L'entreprise de restauration peut demander des produits tout au long de l'année.

5.2 Méthodologie de test du programme

Nous cherchons à connaître la meilleure combinaison de clients pour valoriser une production donnée de la ferme avec une ressource en main d'œuvre fixe prédéfinie. Une souplesse est apportée à laquelle vient s'ajouter une main d'œuvre intérimaire payée à l'heure.

Nous testons les modalités suivantes :

— Trois scénarios de production correspondant à différentes tailles d'exploitation : 2 hectares, 4 hectares et 10 hectares.
— Deux niveaux de diversité de produits : 40 produits ou 72 produits. Cette diversité de produits intervient pour tous les clients, mais ne signifie pas que la ferme produit l'intégralité des produits. Le producteur peut pratiquer l'achat-revente pour les produits qu'il ne cultive pas.
— La possibilité ou non de pratiquer l'achat-revente.
— Trois scénarios de temps de main d'œuvre disponible chaque jour sur l'exploitation pour la commercialisation : 4 heures, 8 heures ou 16 heures. Dans la réalité, les limites entre temps de commercialisation, temps de culture et temps de gestion sont rarement aussi distincts.
— La possibilité ou non d'employer de la main d'œuvre ponctuelle en complément de la main d'œuvre de l'exploitation.

Le programme linéaire mixte est résolu avec la même configuration matérielle et logicielle que le chapitre 2. Comme précédemment, nous testons quatre pas de temps pour valider le programme sur un horizon de planification de un an : 364 périodes de 1 jour, 182 périodes de 2 jours, 91 périodes de 4 jours et 52 périodes d'une semaine.

5.3 Exemple de résultats sur une instance

Nous présentons ici, à titre d'exemple et pour faciliter la compréhension du fonctionnement du modèle, les résultats obtenus par le modèle pour une des instances étudiées. La situation étudiée est celle d'une ferme :

— de petite surface, autour de 2 ha,
— pouvant commercialiser 72 produits différents (voir tableaux 4.5),
— pouvant affecter un temps plein à la commercialisation des produits (8 heures par jour),
— ne pratiquant pas l'achat-revente,
— pouvant employer une main d'œuvre supplémentaire pour la commercialisation.
— avec un horizon de planification de un an divisé en 52 périodes d'une semaine.

La figure 4.7 représente l'affectation des produits de l'exploitation aux différents clients. Dans cette instance, la vente en demande contractuelle $textcd$ n'est pas intéressante pour la ferme, les demandes contractuelles proposées étant trop contraignantes et trop peu rémunératrices en moyenne sur l'année. Pour les Amap, le poids minimal du panier est fourni tout au long de l'année. Des volumes "bonus" sont ajoutés au panier en pleine saison de production : ces produits sont mis à disposition gratuitement, du fait de l'obligation de vendre ou de jeter tous les produits avant l'âge maximal B_p (contraintes 4.9). Les volumes "bonus" sont trop faibles pour justifier une vente à des grossistes et amortir les coûts de livraison. Nous observons que la gamme de produits proposés dans les paniers évolue au fil de l'année, tout en respectant les gammes de poids minimal et maximal pour chaque

produit. Les périodes creuses de livraison correspondent aux périodes de fermeture des Amap choisies dans l'instance (voir présentation des clients plus haut), périodes pendant lesquelles les producteurs finissent les stocks de produits d'hiver et n'ont pas encore récolté les produits de printemps.

Concernant les marchés, nous visualisons la temporalité des marchés, tant en volumes et en diversité de produits à commercialiser qu'en fréquentation du marché par les clients. En hiver, le marché attire moins de chalands qu'en pleine saison. Le producteur adapte son offre à cette temporalité, mais doit respecter des volumes minimal et maximal visibles sur les graphes. Notons que le pic de livraison en fin d'année est un artefact du modèle : nous imposons ici que les stocks soient vidés à la fin de la période. Dans d'autres modalités, un transfert des stocks de fin d'année en début d'année permettrait de simuler un fonctionnement de routine.

Une part importance de la production est vendue aux grossistes, en priorité au grossiste WS0, acceptant de plus petits volumes à de meilleurs prix. La livraison aux grossistes a lieu préférentiellement en pleine saison de production, l'été et l'automne, quand les autres débouchés sont déjà saturés. Enfin, certains produits ne peuvent être livrés avant leur date de péremption et/ou se dégradent lors du stockage et sont éliminés du stock.

La figure 4.8 représente le revenu généré par les différents débouchés à chaque période, composé des ventes moins les coûts de transport et d'emplacement le cas échéant. La complémentarité des différents types de clients y apparait clairement. Les Amap assurent un socle de revenu fixe, stable mais peu élevé. Les marchés développent un revenu tout au long de l'année, variable en fonction de la gamme de produits et des quantités vendues. Les grossistes apportent un complément non négligeable en pic de production. De ces revenus sont soustraits les coûts liés à l'embauche de main d'œuvre de commercialisation pour obtenir le revenu global de la commercialisation par période. Le revenu cumulé sur l'horizon de planification s'élève à 1,25 millions d'euros, résultat surestimé par rapport à la réalité.

Nous pouvons tirer plusieurs remarques de cet exemple. Tout d'abord, la solution exploite bien les complémentarités entre les différents types de clients pour commercialiser les produits de l'exploitation. Notre modèle répond donc l'objectif d'accompagner le producteur dans ses décisions sur les débouchés de ses produits. Cependant, les prix de vente aux différents débouchés et les volumes minimal et maximal à chaque période gagneront à être étudiés avec plus d'attention. Les revenus de la vente aux marchés et aux grossistes représentent 91% des revenus de l'exploitation, ce qui paraît démesuré pour une petite exploitation. Enfin, la main d'œuvre de commercialisation, employée à l'heure dans le modèle, est très largement employée, à raison de 134 heures en moyenne par semaine (de 77 à 180 heures), soit entre 2 et 5 salariés aux 35 heures. Dans les développements ultérieurs du modèle, il serait pertinent de considérer des profils de main d'œuvre, comme présentés dans la section 2.4 du chapitre 2, et d'inclure un temps de management de la force de vente, comme dans le modèle de planification tactique.

Nous présentons dans la section suivante l'analyse des résultats pour toutes les instances testées.

5.4 Résultats numériques et analyse des performances du modèle

Nous avons présenté les différentes modalités de test du programme linéaire mixte dans la section 4.5.2. Le programme a pu être résolu pour les modalités à 52 ou 91 périodes dans l'année. Les résultats sont présentés dans les tableaux 3, 4 et 5 aux pages 150, 151 et 152. Pour les modalités

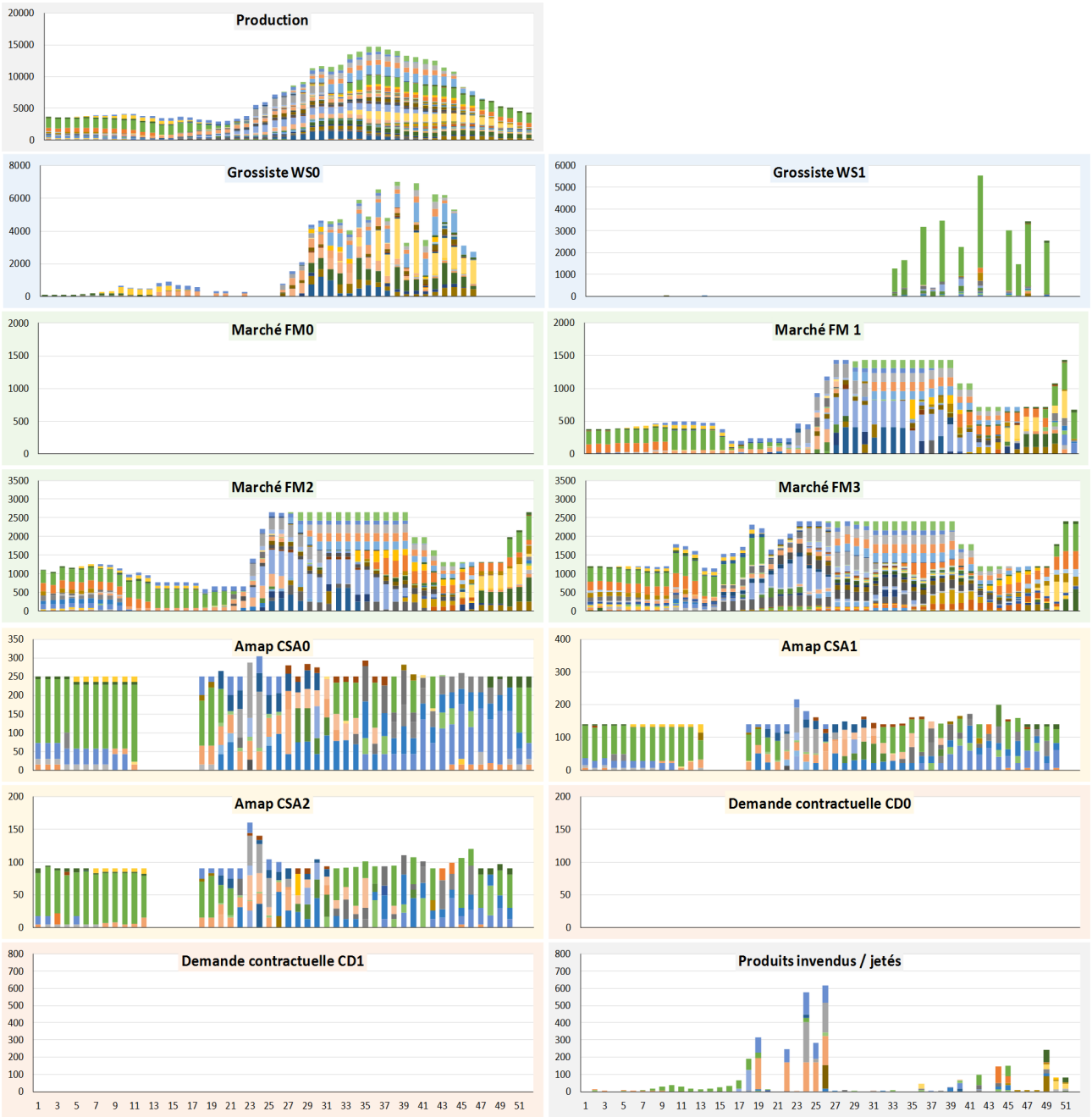


FIGURE 4.7 – *Production de la ferme et réponse aux demandes des différents clients. Chaque barre représente la quantité livrée par période au client, chaque couleur représentant un des produits. Quantité en kg en ordonnées, semaines en abscisses*

à 182 ou 364 périodes par an, la construction du programme linaire mixte dépasse les capacités de mémoire du système, même pour les instances avec le plus petit nombre de produits (40 produits considérés). Comme présenté dans le tableau 4.7, la taille du programme croit rapidement avec le nombre de produits p, de périodes t et de clients c. La taille du modèle, pour le nombre de contraintes comme pour le nombre de variables, est en $\mathcal{O}(|P||T|^2 + |C||P||T|)$. La formulation sature rapidement la capacité mémoire du système.

Sur l'ensemble des instances, les demandes contractuelles ne sont pas intéressantes et ce type de client n'est pas sélectionné. De même, la solution n'exploite pas l'achat-revente pour répondre

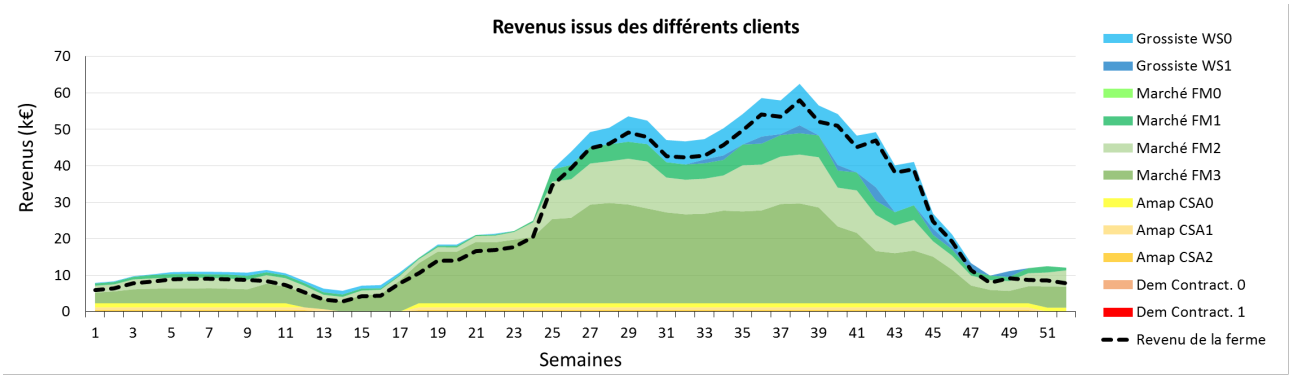


FIGURE 4.8 – *Part des différents clients dans l'élaboration du revenu de l'exploitation. La courbe pointillée correspond au revenu total de l'exploiation, après soustraction des coûts de main d'œuvre de vente.*

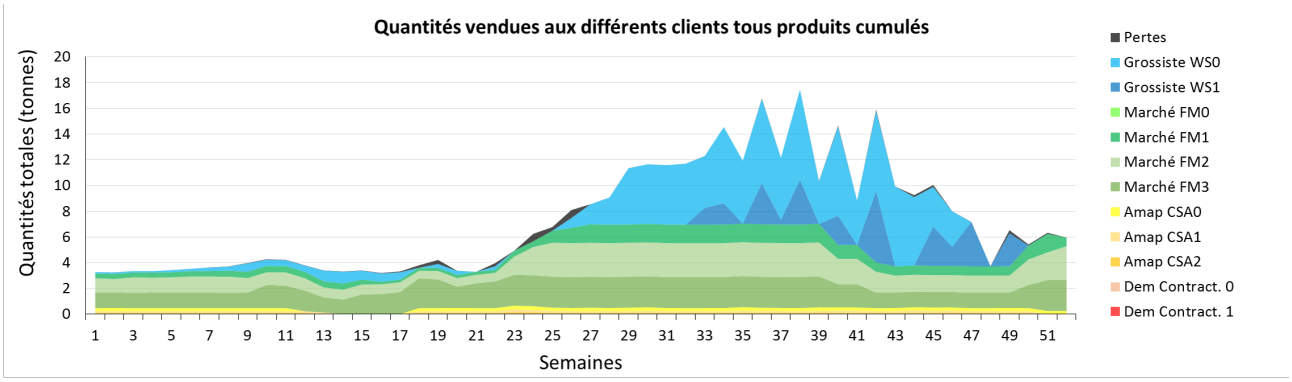


FIGURE 4.9 – *Part des différents clients dans la commercialisation des quantités produites sur l'exploitation*

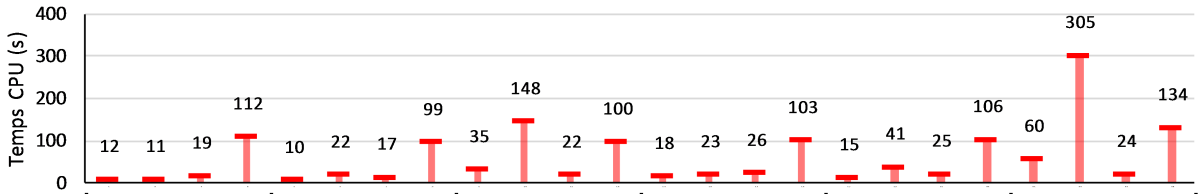
		52	91	182	364
40 produits	Variables réelles	52 313	135 227	488 853	1 851 305
	Variables booléennes	37 865	66 257	132 505	265 001
	Contraintes	144 930	340 983	1 118 760	3 984 714
73 produits	Variables réelles	95 213	246 338	891 255	3 376 829
	Variables booléennes	68 753	120 311	240 613	481 217
	Contraintes	263 334	620 262	2 037 678	7 263 990

TABLE 4.7 – *Nombre de variables et de contraintes dans le modèle selon les modalités de résolution*

aux clients. Dans les instances générées, la production est suffisante, tant en quantité qu'en diversité pour livrer les marchés les plus rémunérateurs et l'excédent est écoulé chez les grossistes.

Le pas de temps choisi influe sur la structure de la solution finale. Le tableau 4.8 présente, pour l'instance de 2 hectares, les temps de résolution et les clients sélectionnés en fonction du pas de temps choisi et de la possibilité d'employer de la main d'œuvre de vente additionnelle (MO+). Quand le producteur doit se contenter de la main d'œuvre présente sur l'exploitation, une grande part de la production est vendue à des grossistes. Dans l'exemple, les marchés de producteurs, très consommateurs en main d'œuvre, peuvent être servis lorsqu'il est possible d'employer de la main d'œuvre supplémentaire. Le modèle peut être utilisé pour tester l'intérêt de livrer les différents clients en fonction du coût réel ou du coût d'opportunité de la main d'œuvre. En outre, nous constatons que la combinaison de clients diffère selon que le pas de temps choisi est 52 ou 91 périodes par an,

en raison de la prise en compte de la périssabilité des produits. La validation du modèle sur une exploitation réelle permettra de comparer les résultats aux différents pas de temps avec les résultats de la ferme.



Dem Contract 1																								
Dem Contract 2																								
Grossiste 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Grossiste 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Marché 1	✓					✓				✓			✓					✓				✓		
Marché 2			✓		✓		✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓
Marché 3			✓	✓			✓	✓			✓	✓			✓	✓			✓	✓			✓	✓
Marché 4			✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓
Amap 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Amap 2		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Amap 3		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓
nbPeriodes	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91	52	91
Main d'œuvre suppl			MO+	MO+			MO+	MO+			MO+	MO+			MO+	MO+			MO+	MO+			MO+	MO+
Surf / Pdts / MO	2ha / 40pdts / 4h/j				2ha / 40pdts / 8h/j				2ha / 40pdts / 16h/j				2ha / 73pdts / 4h/j				2ha / 73pdts / 8h/j				2ha / 73pdts / 16h/j			

Surf : *surface de la ferme.* Pdts : *nombre de produits*. MO : *heures de main d'œuvre disponibles chaque jour sur la ferme pour la commercialisation.*

TABLE 4.8 – *Impact du pas de temps choisi sur les clients sélectionnés dans la solution. Cas de la ferme de 2 ha*

Les temps de résolution restent acceptables pour les instances à 52 et 91 périodes, respectivement 23,8 $\pm$ 21,2 secondes et 59,4 $\pm$ 54,7 secondes. Nous n'avons pas mis en œuvre des processus d'optimisation de la résolution à ce jour. Plusieurs pistes d'optimisation de la résolution du programme sont envisageables.

Tout d'abord, il faudrait filtrer les variables et les contraintes actives dans le modèle. Parmi les variables dénombrées dans le tableau 4.7, nombre d'entre elles sont fixées à zéro du fait de l'absence de production ou de demandes à certaines périodes. Il en est de même pour des contraintes. Nous pourrions ainsi réduire la taille du modèle et permettre la résolution d'instances plus importantes. Ensuite, nous pourrons nous intéresser à la structure des différents clients pour chercher à déterminer des indicateurs de rentabilité des clients par rapport aux ressources de la ferme. Il sera sans doute possible de prioriser les différents clients pour affecter en priorité les plus rentables. Nous pourrions utiliser ces pondérations ou ces ordres de priorité des différents clients dans une stratégie de branchement du *branch and bound* pour obtenir plus rapidement et plus efficacement la solution optimale. Reste à déterminer comment appliquer cette stratégie tout en tenant compte du caractère combinatoire de l'affectation des produits aux différents clients.

6 Conclusion et perspectives

Nous présentons dans ce chapitre un modèle d'aide à la décision pour aider les maraîchers à sélectionner les clients les plus rentables compte-tenu de la production de la ferme, de ses ressources,

des caractéristiques de la demande des clients et de la possibilité de pratiquer l'achat-revente auprès d'autres fermes. Notre modèle présente deux principales originalités. Premièrement, il permet de sélectionner, non pas les clients les plus rentables indépendamment, mais la combinaison de clients la plus profitable, en tenant compte du caractère périssable des fruits et légumes frais. Deuxièmement, le modèle intègre les coûts et temps de main d'œuvre liés à la livraison des différents clients, afin de comparer les clients à la marge qu'ils permettent d'obtenir et non au chiffre d'affaires généré. Ce modèle permet de s'adapter à des typologies de clients très variées : livraison de paniers, vente en marchés de plein vent, restauration collective ou encore grossistes.

Les premiers résultats numériques sur des instances réalistes sont très satisfaisants et montrent que le modèle répond aux enjeux pour lesquels il est développé. Cependant, des travaux d'optimisation du processus de résolution sont nécessaires pour permettre de prendre en compte des instances de plus grande taille et accélérer la résolution. Une piste serait de décomposer le modèle sur un plus petit horizon de temps ou sur des groupes de clients, pour résoudre des instances de grande taille. Une autre piste serait d'utiliser la programmation dynamique pour construire la solution du modèle. En ajoutant progressivement les clients du plus rentable au moins rentable, ou du moins chronophage au plus chronophage, jusqu'à atteindre les limites de production et de main d'œuvre.

En outre, un critère important manque aujourd'hui à notre modèle, la gestion de la trésorerie. En effet, le producteur sélectionne ses clients en fonction de leurs délais de paiement. En Amap, les clients payent généralement en avance leurs paniers au début de chaque trimestre, alors que le paiement par les grossistes ou la restauration collective peut intervenir plusieurs semaines après livraison. Pour des activités à faible marge comme la production agricole, ce critère de trésorerie est fondamental. L'implémentation de la trésorerie pourrait se faire en définissant des vecteurs temporels pour chacun des objets donnant lieu à des dépenses ou des recettes. Pour la main d'œuvre par exemple, l'emploi d'un profil saisonnier ou permanent donnerait lieu à un décaissement de son salaire au début de chaque mois. De la même façon que nous définissons un calendrier de livraison des Amap ou des clients contractuels, nous pouvons définir un calendrier de paiement. La prise en compte de la trésorerie ne rendrait pas les demandes contractuelles plus intéressantes, car ces contrats long-terme à faibles marges sont surtout intéressants pour la sécurité qu'ils apportent au producteur, par rapport à d'autres débouchés soumis à plus de risques et incertitudes.

Le chapitre suivant s'intéresse à l'interconnexion des différents modèles et aux données d'entrée de l'outil d'aide à la décision, élément fondamental pour obtenir des solutions réalistes.

5 Vers un outil opérationnel intégrant les trois modèles développés

Résumé du chapitre

Nous abordons dans ce chapitre la question de la confrontation de l'approche de modélisation avec la réalité des problématiques de terrain. L'étude de cas concrets, le développement d'une interface utilisateur ou la mise au point d'un outil d'aide à la décision répondant globalement au problème de dimensionnement de ferme maraîchère ont été les fils directeurs de notre démarche de modélisation. Nous présentons ici les travaux préliminaires réalisés sur ces trois sujets, travaux qui constituent des bases solides pour concrétiser le développement d'un outil d'aide à la décision utilisable par des conseillers agricoles ou par des chercheurs en agro-économie.

Dans les chapitres précédents, nous avons présentés trois modèles fonctionnant indépendamment pour accompagner la prise de décisions de plusieurs problèmes liés au dimensionnement de fermes urbaines. Le modèle de planification tactique (chapitre 2) permet de sélectionner les itinéraires techniques avec un pas de temps fin sur une année pour répondre à une demande client, en tenant compte de la forte périssabilité des fruits et légumes frais et des ressources de l'exploitation, notamment la main d'œuvre. Le modèle de dimensionnement stratégique (chapitre 3) dimensionne et planifie les investissements en infrastructures sur le temps long, de 5 à 30 ans, en fonction des perspectives de marchés, en prenant en compte là encore la main d'œuvre de la ferme. Le modèle de sélection des clients (chapitre 4) aide à définir la meilleure combinaison de clients pour commercialiser une production donnée de la ferme, en ayant recours à l'achat-revente de produits si nécessaire pour satisfaire totalement la demande des clients.

Ces modèles sont destinés à fonctionner de façon coordonnée au sein d'un unique outil qui pourra répondre à des questions concrètes des producteurs, de leurs conseillers agricoles ou d'autres acteurs de la chaîne de valeur. Nous débutons ce chapitre en abordant des cas concrets sur lesquels nous avons travaillé pour construire l'outil. Ces cas illustrent les objectifs que nous nous fixons, tant sur l'aggrégation des données nécessaires au modèle que sur l'articulation des différents modèles. Nous étudions, dans la section 2, la question de la provenance, de la qualité et de l'utilisation des données par les utilisateurs. Enfin, nous présentons, dans la section 3, l'état de nos réflexions sur la combinaison des trois modèles.

1 L'étude de cas concrets pour construire et paramétrer les modèles

L'outil d'aide à la décision que nous développons peut accompagner des projets de fermes maraîchères diversifiées dans des contextes urbains ou périurbains, pour des projets réels d'exploitants ou pour des projets de recherche. Nous nous sommes basés sur des cas concrets pour réfléchir à l'architecture du modèle global.

Le travail sur les cas concrets nous permet :
- de valider dans des situations variées la pertinence et les limites de l'outil d'aide à la décision,
- d'évaluer les temps de résolution lorsque des variables stratégiques sont fixées par le contexte : surface des parcelles, main d'œuvre disponible, itinéraires techniques et infrastructures déjà en place, etc.
- d'identifier les pas de temps les plus adaptés pour les différents modèles pour allier pertinence des résultats et résolution rapide et peu consommatrice de mémoire,
- d'identifier des éventuelles variables ou paramètres moins pertinents, dont la suppression pourrait améliorer les performances du modèles.

1.1 Le travail au sein des Fermes de Gally

Réaliser la thèse au sein d'une entreprise agricole comme les *Fermes de Gally* offre l'opportunité de confronter les objectifs et les résultats de l'outil à la réalité des activités agricoles. Nous avons présenté, dans le chapitre 2, le test du modèle de planification tactique sur le cas du démonstrateur d'agriculture urbaine *Les Fermes en Villes* exploité par les *Fermes de Gally*. Ce cas mériterait d'être

approfondi, notamment pour l'inclusion des activités para-agricoles que sont la location de jardins et la pédagogie.

D'autres problèmes sont en cours d'études aux *Fermes de Gally*. D'une part, la planification des emplois saisonniers est complexe sur une ferme maraîchère de 60 hectares. Certaines cultures sont plus exigeantes en main d'œuvre que d'autres et les besoins de main d'œuvre varient d'une année à l'autre en fonction des cultures sélectionnées. Nous paramétrons les modèles pour accompagner la prise de décision du chef d'exploitation pour les cultures les plus chronophages, fraises et tomates notamment. D'autre part, d'autres projets de revalorisation de friches intra-urbaines et périurbaines par l'agriculture sont à l'étude et l'outil d'aide à la décision que nous développons pourrait aider à définir les directions à privilégier.

1.2 Le travail avec les chambres d'agriculture

L'outil que nous développons est à destination des conseillers agricoles. Il nous semble important de connaître leurs besoins et leurs méthodes de travail, pour que l'outil ait une chance d'être utilisé. Nous collaborons avec deux chambres d'agriculture, organismes consulaires qui représentent l'ensemble des acteurs économiques de l'agriculture et accompagnent les producteurs dans le développement de leurs exploitations.

Les chambres d'agriculture nous fournissent des cas d'études concrets, d'exploitants s'étant installés ou ayant réalisé un projet de diversification il y a quelques années. Nous avons donc accès à une situation de départ, de référence, ainsi qu'à l'évolution de l'entreprise suite au projet. Les résultats technico-économique sur plusieurs années permettront de paramétrer et de valider le modèle pour bien simuler la dynamique de la ferme.

1.3 Le travail avec un centre de recherche en développement agricole

Nous collaborons depuis deux ans avec le Cirad, centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, pour tester notre outil dans d'autres contextes que les zones urbaines métropolitaines. Le Cirad est un organisme de recherche et d'expertise qui produit et transmet de nouvelles connaissances pour accompagner l'innovation et le développement agricole, principalement dans les zones tropicales et subtropicales. Le Cirad et l'Inra, institut national pour la recherche agronomique, ont lancé le projet EcoVerger en 2015, pour accompagner la réduction de l'utilisation des pesticides dans les vergers. Deux contextes de vergers sont étudiés, le verger de pêchers dans le sud de la France et le verger de manguiers sur l'Île de la Réunion. Ce projet vise à définir de nouveaux itinéraires techniques économes en pesticides et efficaces pour limiter les dommages causés par les bioagresseurs.

Nous travaillons sur le cas des vergers de manguiers à la Réunion, avec deux chercheurs du Cirad. Nous nous intéressons à la viabilité technico-économiques de nouveaux itinéraires techniques conçus grâce à un modèle bio-physique de croissance de l'arbre développé par l'équipe d'agronomes du projet EcoVerger. Un itinéraire technique peut être rentable en lui-même mais il ne trouvera sa place dans le fonctionnement de l'exploitation que s'il est complémentaire avec les autres activités de l'exploitation dans l'utilisation des ressources sol, capital et travail. Avec l'aide de deux stagiaires basés sur l'île, nous cherchons à établir une typologie des exploitations agricoles produisant de la mangue à la Réunion. Cette typologie est basée sur la structure des exploitations mais aussi sur les

règles de décision des producteurs. Bien que focalisé sur le verger de manguiers, le projet s'intéresse au fonctionnement global de l'exploitation pour comprendre l'affectation des ressources entre les différentes cultures et les objectifs du producteur quant à la conduite du verger de manguiers. Le projet prend aussi en compte les modes de commercialisation des produits de la ferme et l'influence des débouchés sur les choix de production.

L'outil d'aide à la décision présenté dans ce manuscrit se prête bien à la modélisation des décisions du producteur et de leur impact sur les performances technico-économiques de l'exploitation. En testant *in silico* l'introduction d'un nouvel itinéraire technique économe en pesticides, nous espérons pouvoir évaluer son adéquation avec le fonctionnement des différents types d'exploitations et d'identifier, le cas échéant, les points de blocage à lever. Par exemple, l'adoption d'une nouvelle pratique peut être limitée si elle est exigente en main d'œuvre à une période déjà chargée sur l'exploitation. Nous sommes en cours de recueil des données et des règles de décisions auprès des producteurs, avant de passer à la phase de test du modèle.

Même si nous n'avons pas pu finaliser l'évaluation des modèles sur ces cas concrets, l'étude de ces cas nous permet d'ores et déjà d'identifier deux enjeux forts pour l'outil d'aide à la décision : le recueil et la qualité des données, et les techniques de résolution pour s'adapter aux différentes situations.

2 Données sources et interface utilisateur

2.1 Données sources

Les données sont le cœur de l'outil d'aide à la décision. Des données de qualité sont indispensables pour espérer une solution réaliste, mais leur collecte et leur mise en forme sont très chronophages. En effet, il n'existe pas à notre connaissance de bases de données d'itinéraires techniques à un format uniformisé pour les fruits et légumes, que nous pourrions utiliser pour nos modèles. Les données les plus couramment disponibles sont données à l'échelle d'une année ou au mois, et ce pas de temps ne nous permet pas de prendre en compte la périssabilité des produits.

Pour que la collecte des données ne soit pas un frein à l'utilisation de l'outil d'aide à la décision, nous souhaitons constituer au fil du temps une base de données d'itinéraires techniques dans laquelle piocher pour chaque étude. Comme évoqué dans la présentation de la modélisation des itinéraires techniques (section 2.3 du chapitre 2), les données sont définies pour une zone géographique cohérente du point de vue des conditions agro-pédo-climatiques, des prix de marchés, des coûts de main d'œuvre, etc. Le niveau de modélisation stratégico-tactique permet d'utiliser un même itinéraire pour de nombreuses exploitations tout en garantissant des résultats réalistes. Dans les années à venir, des données pourraient être récupérées sur les plateformes de données libres et d'outils d'aide à la décision interopérables en agriculture en développement aujourd'hui, comme la plateforme API-AGRO (API-AGRO, 2017) soutenue par les instituts techniques agricoles et les Chambres d'agriculture.

L'enjeu est double pour la question des données dans notre outil d'aide à la décision. D'une part, il nous faut collecter et mettre en forme des jeux de données cohérents sur différents territoires, comme nous le faisons par exemple avec le Cirad à la Réunion. D'autre part, nous devons permettre

aux utilisateurs d'identifier rapidement les données préremplies qui correspondent à la situation qu'ils veulent modéliser, grâce à une interface utilisateur.

2.2 Interface utilisateur

Comme le présentent Woodward *et al.* (2008), un outil logiciel ne se limite pas à une modélisation pertinente du système étudié, mais doit inclure une interface qui permet aux utilisateurs d'interagir avec le modèle. Ces auteurs précisent que le design de l'interface devrait être basé sur une analyse des tâches que les utilisateurs devront réaliser.

FIGURE 5.1 – *Maquette de l'interface graphique de saisie des paramètres de l'outil et de visualisation des résultats*

Sur la base des situations rencontrées dans les cas concrets, nous avons commencé à concevoir une interface pour permettre une utilisation aisée et rapide de l'outil d'aide à la décision. Nous avons réalisé un diagramme des cas d'utlisation et un diagramme des classes selon l'approche UML (*Unified Modeling Language*) avec l'aide des ingénieurs de recherche du laboratoire G-SCOP. Nous poursuivons l'objectif de permettre à l'utilisateur de modéliser le fonctionnement d'une ferme en quelques minutes au fur et à mesure de sa decription par le producteur. La base de données contient les itinéraires techniques, les types de clients, les prix des produits, les profils de main d'œuvre et les salaires associés, les infrastructures. L'utilisateur peut les sélectionner ou modifier certains paramètres. L'interface sert aussi à afficher les résultats technico-économiques issus de l'optimisation (figure 5.1). Avec l'aide des ingénieurs de recherche du laboratoire G-SCOP, nous avons développé une première version de l'interface basée sur le langage Groovy et le framework de développement web Grails. L'interface reste à ce jour à finaliser pour permettre l'utilisation complète des trois modèles en un seul et même outil d'aide à la décision.

3 Assemblage et connexion des modèles

Les trois modèles présentés dans les chapitres précédents ont été pensés pour être complémentaires. Ils répondent à des problématiques différentes, qui sont souvent combinées dans le problème de dimensionnement des fermes maraîchères diversifiées. Au cours de la thèse, nous n'avons pas eu le temps de développer et de tester des algorithmes reliant ou combinant les trois modèles. Nous présentons ici l'état de nos réflexions sur cette connexion des modèles. La figure 5.2 décrit le processus de résolution envisagé pour un problème de dimensionnement de ferme.

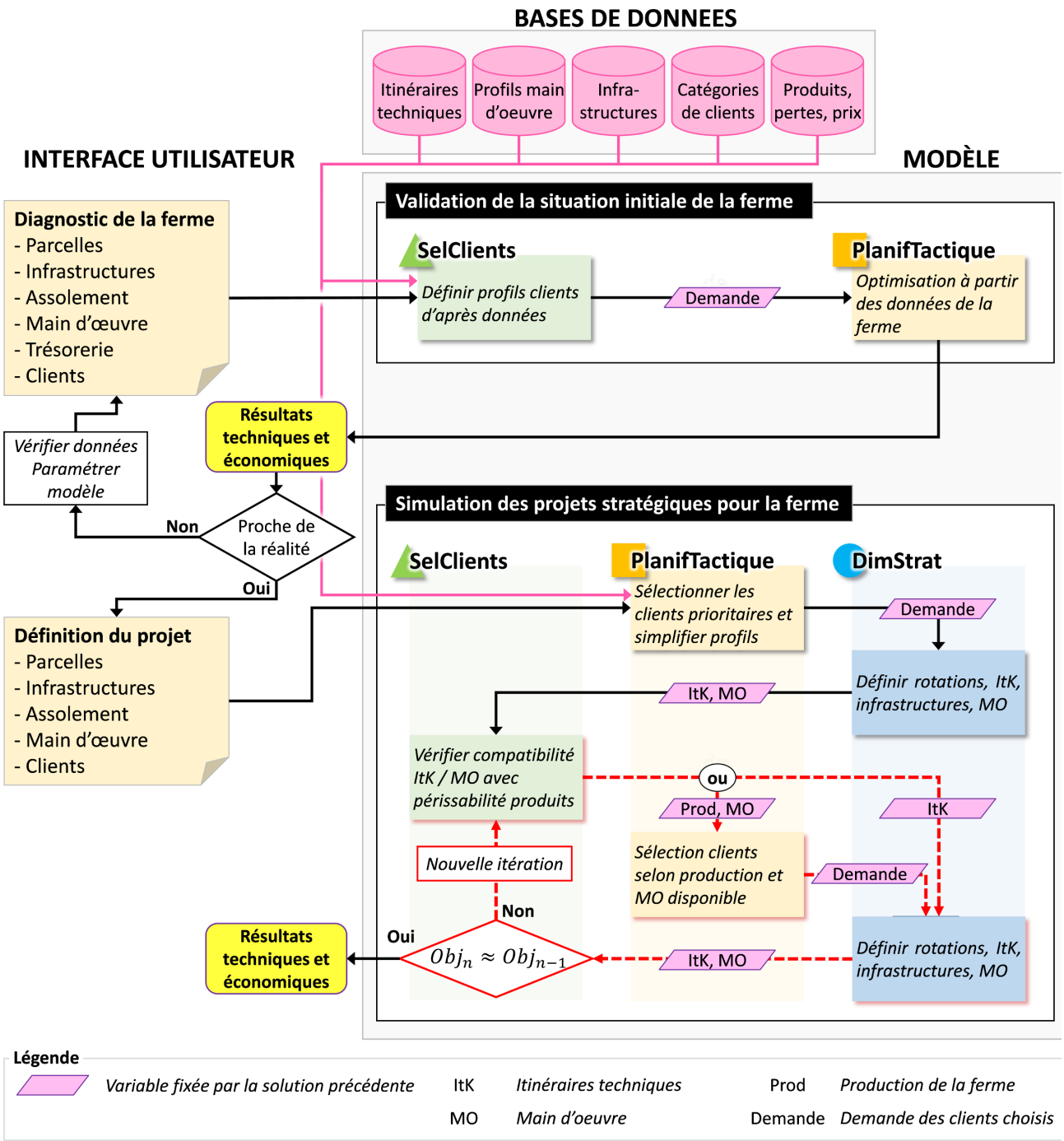


FIGURE 5.2 – *Processus de résolution des problèmes de dimensionnement de fermes maraîchères diversifiées*

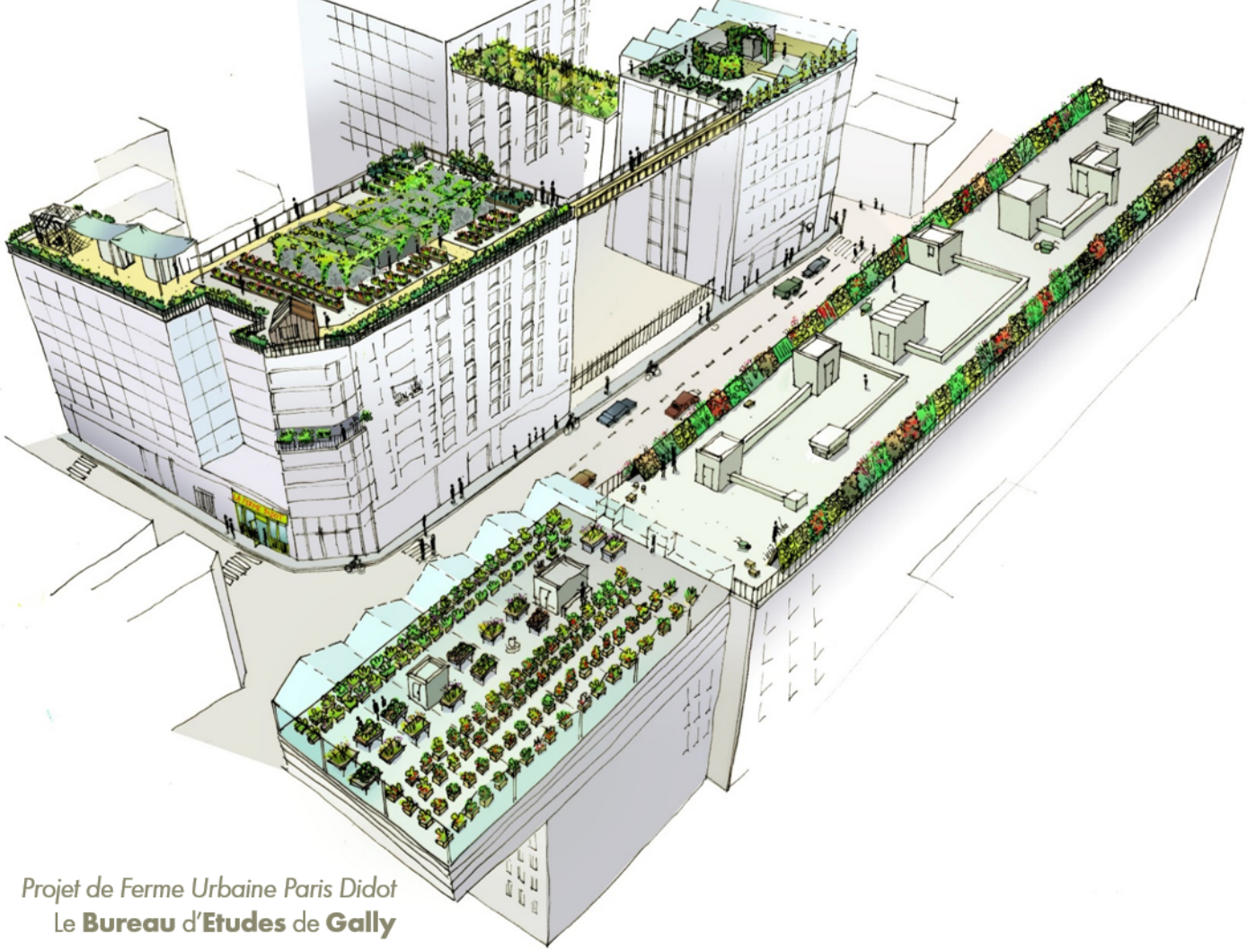
L'utilisateur commence par sélectionner ou créer les données de la situation actuelle de la ferme, via l'interface utilisateur. Cette étape vise à valider les données, le modèle et les résultats avec le producteur. Le modèle de sélection des clients aggrège les profils clients sélectionnés pour créer un paramètre demande. Cette demande, définie par des volumes et des prix cibles, est utilisée par le modèle de planification tactique pour simuler une année type de la ferme actuelle. L'affichage des résultats avec des indicateurs facilement compréhensibles par le producteur lui permet de comparer la solution proposée à sa vision de la ferme. (voir exemple à la figure 5.1). Si le résultat est éloigné de la réalité, un nouveau travail de définition des paramètres de la ferme et de paramétrage du modèle est nécessaire. Cette étape permet d'établir la confiance et la compréhension du producteur en l'outil.

Si les résultats issus du modèle sont satisfaisants, le producteur passe à la phase de projet, en définissant son objectif et la façon dont va se traduire le projet. Qu'est-ce qui ne change pas sur l'exploitation ? Quelles nouvelles ressources ? Quelles nouvelles productions ? Quels investissements ? Le producteur peut fixer des éléments du système et choisir d'en laisser d'autres libres pour observer les directions proposées dans les solutions de l'outil. Les différents modèles se succèdent alors pour converger vers une solution satisfaisante. A chaque étape, la solution d'un modèle permet de fixer certaines variables ou de resserrer les bornes du problème pour le modèle suivant. Lorsque les solutions de deux itérations successives sont égales, à un écart près définit par l'utilisateur, la solution obtenue est considérée satisfaisante et les résultats sont présentés à l'utilisateur via l'interface, sous la forme d'indicateurs et de graphiques.

L'approche présentée ici n'est que l'ébauche du travail à venir. L'étude poussée des cas concrets présentés plus haut nous semble indispensable pour approfondir la réflexion sur la connexion des différents modèles. Et, si chacun des modèles nécessite un travail d'optimisation du processus de résolution, la définition d'un algorithme de résolution des problèmes de dimensionnement de fermes reliant les trois problèmes peut permettre d'identifier les pistes d'optimisation prioritaires.

4 Conclusion et perspectives

Nous avons abordé dans ce chapitre la question de la confrontation de l'approche de modélisation avec la réalité des problématiques de terrain. L'étude de cas concrets, le développement de l'interface homme-machine ou la mise au point d'un outil d'aide à la décision répondant globalement au problème de dimensionnement de ferme maraîchère ont été des fils directeurs de notre démarche de modélisation. Les travaux préliminaires réalisés sur ces sujets constituent des bases solides pour concrétiser le développement d'un outil d'aide à la décision utilisable par des conseillers agricoles ou par des chercheurs en agro-économie. Nous avons créé des partenariats constructifs avec des structures publiques ou privées, potentielles futures utilisatrices de l'outil, pour identifier en amont les attentes et les freins au déploiement de ce dernier. Le travail à venir avec ces structures nous permettra de finaliser l'interface web et de développer des algorithmes efficaces pour résoudre le problème global que nous traitons.



Conclusion générale

L'engouement actuel pour l'agriculture urbaine et les circuits courts offre aux producteurs agricoles intra-urbains et péri-urbains une opportunité de développer de nouvelles activités et de cibler de nouveaux débouchés. Les maraîchers, habitués à gérer une production très diversifiée, ont aussi à gérer les multiples opportunités liées à la proximité de la ville - nombreux débouchés, pouvoir d'achat élevé, développement d'activités para-agricoles - mais aussi les multiples contraintes urbaines - coût du foncier, coût et qualification de la main d'œuvre, logistique et transport. Les *Fermes de Gally*, entreprise péri-urbaine d'agriculture et de paysage, est directement concernée par ces problématiques de combinaison de diverses activités pour définir un modèle économique viable en contexte urbain. Nous avons présenté les outils d'aide à la décision que nous avons développés pour accompagner des maraîchers diversifiés professionnels dans leurs choix stratégiques en tenant compte des spécificités du contexte de leur entreprise.

Nous avons proposé trois modèles d'aide à la décision, formulés en programmation linéaire mixte, pour répondre à trois problématiques agri-urbaines.

1. Comment choisir la surface à affecter à différentes productions sur une année de culture, pour répondre à une demande donnée, en tenant compte du caractère périssable des fruits et légumes frais et des contraintes sur l'emploi de la main d'œuvre ?

2. Comment planifier les successions de cultures sur plusieurs années à l'échelle de la ferme, en tenant compte des infrastructures et équipements nécessaires aux cultures, des besoins

en main d'œuvre et de l'impact de la périssabilité des produits sur la réponse à la demande des clients ?

3. Enfin, comment sélectionner la combinaison de clients de différents types pour valoriser au mieux la production de la ferme, en tenant compte de la périssabilité des produits et des coûts et temps logistiques ?

Pour chacune de ces problématiques, un modèle a été implémenté en programmation linéaire mixte. Nous avons défini une formulation spécifique pour les itinéraires techniques, pour les profils de main d'œuvre ainsi que pour les différents types de clients, afin de traduire au mieux les inter-relations entre les activités et les ressources qui se trouvent combinées dans les exploitations agri-urbaines. Pour tester nos modèles sur des cas réels ou réalistes, nous avons recueilli et mis en forme des données sur tous les éléments des systèmes de production étudiés. Sur les cas étudiés, les solutions sont cohérentes avec le fonctionnement observé dans les exploitations agricoles urbaines. Les tests confirment l'intérêt d'utiliser un pas de temps court, de l'ordre de quelques jours, pour définir le dimensionnement stratégique de l'exploitation agricole, du fait de la forte périssabilité des produits. Nous nous focalisons sur la combinaison des éléments du système de production, à différentes échelles spatiales et temporelles, pour obtenir le meilleur dimensionnement de l'exploitation.

Nous proposons enfin une approche de combinaison des trois modèles développés en un unique outil d'aide à la décision utilisable par les conseillers agricoles, public cible de nos travaux. Nous présentons un prototype d'interface web permettant d'interagir de façon ergonomique avec les différents modèles interconnectés. Avant d'aller plus loin dans le développement de l'interface, nous devons tester et paramétrer les modèles sur de nouveaux cas concrets de fermes urbaines et valider la pertinence et l'efficacité de l'outil d'aide à la décision global tel que nous le concevons.

Les travaux présentés dans cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives de recherche. Tout d'abord, nous souhaitons améliorer les processus de résolution pour traiter des instances de grande taille plus efficacement. Nous étudierons pour cela, d'une part, les pré-traitements qui peuvent permettre de réduire la taille du problème et d'en resserrer les bornes. D'autre part, nous rechercherons aussi une formulation des problèmes avec moins de variables binaires. Nous utiliserons aussi des techniques de relaxation ou de décomposition afin d'obtenir des méthodes de résolution approchée de bonne qualité, avec des temps de résolution plus rapide, notamment lorsque l'optimalité des solutions n'est pas recherchée.

Si nous parvenons à une plus grande efficacité dans la résolution, nous pourrons envisager d'utiliser des solveurs libres, ou des solveurs commerciaux moins coûteux que CPLEX. Le solveur commercial CPLEX est très performant, mais les faibles marges du secteur des fruits et légumes frais sont incompatibles avec le prix des licences commerciales de CPLEX.

Enfin, si les travaux et les résultats présentés ici constituent une preuve de concept encourageante pour notre approche, nous devons valider la pertinente et l'utilité des outils d'aide à la décision, sur le terrain. L'expérimentation *in situ* est indispensable pour aller plus loin dans le paramétrage de l'outil et la définition des indicateurs de sorties qui accompagneront la décision des maraîchers.

Bibliographie

FAO Statistical Pocketbook 2015. Rapport technique, 2015.

Stéphane Africano, Florence Grabulos et Samuel Mansard : Les Coûts de Production en cultures raisonnée et biologique : Arboriculture, Viticulture et Maraîchage - Références Pyrénées orientales. Rapport technique, Chambre d'agriculture Roussillon, 2010.

Mohammad Hasan Aghdaie et Maryam Alimardani : Target market selection based on market segment evaluation : a multiple attribute decision making approach. *International Journal of Operational Research*, 24(3):262–278, 2015.

Agreste : Un producteur sur cinq vend en circuit court. Rapport technique, Ministère de l'Agriculture, 2012.

Omar Ahumada et J. Rene Villalobos : Application of planning models in the agri-food supply chain : A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1):1–20, jul 2009.

Omar Ahumada et J Rene Villalobos : A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190:339–358, 2011a.

Omar Ahumada et J Rene Villalobos : Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. *Intern. Journal of Production Economics*, 133 (2):677–687, 2011b.

Md Mostofa Akbar, M. Sohel Rahman, M. Kaykobad, E. G. Manning et G. C. Shoja : Solving the multidimensional multiple-choice knapsack Problem by constructing convex hulls. *Computers and Operations Research*, 33(5):1259–1273, 2006.

Laurent Alfandari, Agnès Plateau et Xavier Schepler : A branch-and-price-and-cut approach for sustainable crop rotation planning. 241:872–879, 2015.

Lise Allain et Cécile Bardoulat : Vendre sur un marché de plein vent. Rapport technique 1, GAB 56, 2014.

Pedro Amorim, Hans-Otto Günther et Bernardo Almada-Lobo : Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138(1):89–101, 2012.

Nadine Andrieu, Patrick Dugué, Pierre-Yves Le Gal, Marine Rueff, Noemie Schaller et Aristide Sempore : Validating a Whole Farm Modelling with Stakeholders : Evidence from a West African Case. *Journal of Agricultural Science*, 4(9):159–173, 2012.

Nadine Andrieu et Daniel Maia Nogueira : Modeling biomass flows at the farm level : a discussion support tool for farmers. *Agron. Sustain. Dev*, 30(2010):505–513, 2010.

API-AGRO : Api-Agro, plateforme de données et de services pour l'écosystème agricole, 2017. URL `https://plateforme.api-agro.fr`.

Aprifel : Livret Mieux Consommer. Rapport technique, Agence pour la Recherche et l'Information en Fruits et Légumes, 2014.

Joseph Argouarc'h : Fiches technico-économiques des principaux légumes - culture de plein champ et sous abri. Rapport technique Janvier, CFPPA REnnes-Le-Rheu, Rennes, 2005.

Christian Artigues, Pierre Lopez et Alain Ha : Scheduling under energy constraints. *In International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Montreal, 2009.

Christine Aubry : L'agriculture urbaine, contributrice des stratégies alimentaires des mégapoles ? *24iemes Journées Scientifiques de l'environnement*, 2003:12–14, 2013.

Joachim Aurbacher et Stephan Dabbert : Generating crop sequences in land-use models using maximum entropy and Markov chains. *Agricultural Systems*, 104(6):470–479, 2011.

Joachim Aurbacher, Christian Lippert et Stephan Dabbert : Imperfect markets for used machinery, asynchronous replacement times, and heterogeneity in cost as path-dependent barriers to cooperation between farmers. *Biosystems Engineering*, 108(2):144–153, 2011.

Johann Bachinger et Peter Zander : ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy*, 26:130–143, 2007.

Monique Bakker, Jan Riezebos et Ruud H. Teunter : Review of inventory systems with deterioration since 2001. *European Journal of Operational Research*, 221(2):275–284, 2012.

Banque Mondiale : Base de données de la Banque Mondiale, 2016. URL `http://donnees.banquemondiale.org`.

Mohammed Sameh Belaïd, Van-Dat Cung, Nicolas Brulard et Geoffrey Lafosse : Assessing and analyzing added value on middle food supply chain systems using Value-Stream Mapping tool, a case study in France. *In EFITA WCCA Congress*, Montpellier, 2017.

Bas Berkel : High-Tech Urban Farming : A Business Model to Enable Breakthrough Development. (March):82, 2013.

Pierre Berthelier et Anna Lipchitz : Quel rôle joue l'agriculture dans la croissance et le développement ? *Tiers-Monde*, 46(183):603–624, 2005.

Serge Bonnefoy : Le renouveau de l'Agriurbanisme : enseignements de la recherche-action « Formes agraires- Formes urbaines ». *In Journées Astredhor*, 2016.

Valeria Borodin : *Optimisation et simulation d'unee chaîne logistique : application au secteur de l'agriculture*. Thèse de doctorat, Université Technologique de Troyes, 2014.

George E. Boyhan, William C. Hurst, W. Terry Kelley, Gerard W. Krewer et Kathryn C. Taylor : Postharvest Handling and Transportation of Fruits and Vegetables. Rapport technique, The University of Georgia, 2009.

Nadjib Brahimi, Najib M Najid et Atle Nordli : Single item lot sizing problems. 168:1–16, 2006.

Rob Broekmeulen : Operations management of distribution centers for vegetables and fruits. *International Transactions in Operational Research*, 5(6):501–508, 1998.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung et Nicolas Catusse : Conception de systèmes de production agricoles urbains, un problème de dimensionnement et d'affectation de ressources. *In ROADEF - 16ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, Marseille, 2015a.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung et Nicolas Catusse : Strategic and tactical Urban Farm design, a conception and sizing problem. *In Proceedings of FSD5 5th International Symposium for Farming Systems Design*, Montpellier, 2015b.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung et Nicolas Catusse : Intégration de l'ordonnancement de tâches avec coûts et temps de lancement séquence-dépendants dans le dimensionnement stratégique d'une exploitation agricole maraîchère. *In ROADEF - 17ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, Compiègne, 2016a.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung et Nicolas Catusse : Client selection and combination for farm perishable products. *In 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, pages 5006–5011, Toulouse, 2017a. IFAC.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung, Nicolas Catusse et Cyril Dutrieux : Optimizing the urban farming system design problem. *In 29th Conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization*, Budapest, 2016b.

Nicolas Brulard, Van-dat Cung, Nicolas Catusse et Cyril Dutrieux : An integrated sizing and planning problem in designing urban farming systems. *International Journal of Production Research*, (In revision):1–21, 2017b.

José Vicente Caixeta-Filho, Jan Maarten Van Swaay-neto et Antonio De Pádua Wagemaker : Optimization of the Production Planning and Trade of Lily Flowers at Jan de Wit Company. *Interfaces*, (February 2015), 2002.

Clarisse Ceriani-baillif, Clémence Piro et Clarisse Ceriani : Les pluriactivités agricoles du Nord–Pas-de-Calais. *In 10es Journées de Recherches en Sciences Sociales (JRSS)*, pages 1–22, Paris, 2016.

Xue Chang, Jing Li, Daniel Rodriguez et Qun Su : Agent-based simulation of pricing strategy for agri-products considering customer preference. *International Journal of Production Research*, 54(13):3777–3795, 2016.

Gauthier Chapelle et Charles-Edouard Jolly : Etude sur la viabilité des business modèles en agriculture urbaine dans les pays du Nord. Rapport technique, Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement, Greenloop, Bruxelles, 2013.

Eduardo Daniel Cittadini, Marcel Lubbers, Nico de Ridder, Herman van Keulen et G. D H Claassen : Exploring options for farm-level strategic and tactical decision-making in fruit production systems of South Patagonia, Argentina. *Agricultural Systems*, 98(3):189–198, 2008.

Flavia Clemente, Piero A. Nasuelli et Rodolfo Baggio : Formal network analysis of a food supply chain system : a case study for the Italian agro-food chains. *Journal of Agricultural Informatics*, 6(4):1–16, 2015.

Hubert Cochet : *L'agriculture comparée*. Quae AgroParisTech, 2011a.

Hubert Cochet : Origine et actualité du "système agraire" : retour sur un concept. *Revue Tiers Monde*, 207(3):97–114, 2011b.

Hubert Cochet et Sophie Devienne : Fonctionnement et performances économiques des systèmes de production agricole : une démarche à l'échelle régionale. *Cahiers Agricultures*, 15(6), 2006.

Leandro C. Coelho et Gilbert Laporte : Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products. *Computers and Operations Research*, 47(2014): 42–52, 2014.

Alysson M. Costa, Lana Mara R. dos Santos, Douglas J. Alem et Ricardo H. S. Santos : Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, 219:265–283, jan 2011.

Stéphane Dauzère-Péres, Nabil Absi et Nadjib Brahimi : Synthèse sur les problèmes de lot sizing et perspectives. *In 28ème Journée Francilienne de Recherche Opérationnelle*, pages 1–47, Paris, 2013.

Laure de Biasi, Alexandra Cocquière, Carole Delaporte, Elisabeth Faguer, Cécile Mauclair, Lydia Mykolenlo, Corinne Ropital et Laure Thévenot : Les filières courtes de proximité au sein du système alimentaire francilien : les filières courtes de proximité, chiffres clés et analyse qualitative par mode de commercialisation. Rapport technique, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France, 2015b.

Laure de Biasi, Alexandra Cocquière, Carole Delaporte, Elisabeth Faguer, Cécile Mauclair, Lydia Mykolenlo, Corinne Ropital et Laure Thévenot : Les filières courtes de proximité au sein du système alimentaire francilien : note de synthèse. Rapport technique, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France, 2015a.

Luitzen De Boer, Eva Labro et Pierangela Morlacchi : A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 7(2):75–89, 2001.

Ministère de l'Agriculture : Site du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, page consacrée aux Circuits Courts, 2010. URL `http://agriculture.gouv.fr/organisation-economique-circuits-courts`.

Dickson Despommier : *The Vertical Farm : Feeding the World in the 21st Century*. St. Martin's Press, 2010.

Nina K. Detlefsen et Allan Leck Jensen : Modelling optimal crop sequences using network flows. *Agricultural Systems*, 94:566–572, 2007.

Santiago Dogliotti, Walter A. H. Rossing et Martin K. van Ittersum : ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19(19):239–250, 2003.

Santiago Dogliotti, Walter A. H. Rossing et Martin K. Van Ittersum : Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income : A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 80(3):277–302, 2004.

Lana Mara R. Dos Santos, Alysson M. Costa, Marcos N. Arenales et Ricardo Henrique S. Santos : Sustainable vegetable crop supply problem. *European Journal of Operational Research*, 204(3):639–647, aug 2010.

Lana Mara R. Dos Santos, Philippe Michelon, Marcos Nereu Arenales et Ricardo Henrique Silva Santos : Crop rotation scheduling with adjacency constraints. *Annals of Operations Research*, 190:165–180, 2011.

Andreas Drexl et A. Kimms : Lot sizing and scheduling — Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99(2):221–235, 1997.

Eric Duchemin, Fabien Wegmuller et Anne-marie Legault : Agriculture urbaine : un outil multidimensionnel. *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, 10(2), 2010.

Jérôme Dury, Noémie Schaller, Frédérick Garcia, Arnaud Reynaud et Jacques Eric Bergez : Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2):567–580, jul 2012.

Cyril Dutrieux : Urban agriculture and short circuits : Production optimization. Rapport technique, Grenoble INP - Génie Industriel, Rapport de stage ingénieur adjoint, 2016.

Talaat El-Nazer et Bruce A McCarl : The Choice of Crop Rotation : A Modeling Approach and Case Study. 68(1):127–136, 1986.

Marion Ernwein : *Jardiner la ville neoliberale : la fabrique urbaine de la nature*. Thèse de doctorat, Univ. Geneve, 2015.

Reza Zanjirani Farahani, Shabnam Rezapour, Tammy Drezner et Samira Fallah : Competitive supply chain network design : An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega (United Kingdom)*, 45(2014):92–118, 2014.

Madeleine Ferrières : *Histoire des peurs alimentaires : du Moyen Age à l'aube du XXe Siècle*. Editions du Seuil, 2002.

Vincent Fesquet : Les fermes verticales, utopie ou réalité ? Tentative de typologie. 2013.

FRANCEAGRIMER : Réseau des nouvelles des marchés FranceAgriMer, 2017. URL `https://www.rnm.franceagrimer.fr/`.

Nadège GARAMBOIS et Sophie DEVIENNE : Les systèmes herbagers économes. Une alternative de développement agricole pour l'élevage bovin laitier dans le Bocage vendéen ? *Économie rurale*, 330-331:56–72, 2012.

Frédérick GARCIA, François GUERRIN, Roger MARTIN-CLOUAIRE et Jean-Pierre RELLIER : The Human Side of Agricultural Production Management - the Missing Focus in Simulation Approaches. *In MODSIM*, 2005.

Michael Randolph GAREY et David Stiffler JOHNSON : *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman, 1st editio édition, 1979. ISBN 978-0716710455.

John J. GLEN : Mathematical models in farm planning : A survey. *Operations Research*, 35(5), 1987.

Marcela C. GONZALEZ-ARAYA, Wladimir E. SOTO-SILVA et Luis G. Acosta ESPEJO : Harvest Planning in Apple Orchards Using an Optimization Model. *In Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry*, page 469. International Series in Operations Research & Management Science, 2015.

Suresh Kumar GOYAL et Bibhas Chandra GIRI : Recent trends in modeling of deteriorating inventory. *European Journal of Operational Research*, 134:1–16, 2001.

Alexis GRANDJEAN, Frédéric COURLEUX, Anne-Sophie WEPIERRE et Marie-Sophie DEDIEU : L'agriculture familiale en France métropolitaine : éléments de définition et de quantification. Rapport technique 90, Centre d'études et de prospective du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2016.

Hanyu GU : Improving problem reduction for 0-1 Multidimensional Knapsack Problems with valid inequalities. *Computers and Operations Research*, 71:82–89, 2016.

Adriana C. GUERREIRO, Custódia M L GAGO, Maria L. FALEIRO, Maria G. C. MIGUEL et Maria D C ANTUNES : Raspberry fresh fruit quality as affected by pectin- and alginate-based edible coatings enriched with essential oils. *Scientia Horticulturae*, 194(August):138–146, 2015.

Luis GUIMARÃES, Diego KLABJAN et Bernardo ALMADA-LOBO : Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups. *European Journal of Operational Research*, 239(2014):644–662, 2013.

Diwakar GUPTA et Thorkell MAGNUSSON : The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. *Computers and Operations Research*, 32(4):727–747, 2005.

Yong HE, Shou-yang WANG et K.K. LAI : An optimal production-inventory model for deteriorating items with multiple-market demand. *European Journal of Operational Research*, 203(3):593–600, 2009.

Avi HERBON : Dynamic pricing vs. acquiring information on consumers' heterogeneous sensitivity to product freshness. *International Journal of Production Research*, 52(3):918–933, 2014.

Bernard HERVIEU et Jean VIARD : *L'archipel paysan, la fin de la république agricole*. De l'Aube, 2011.

Mhand HIFI, Mustapha MICHRAFY et Abdelkader SBIHI : Algorithms for the multiple-choice multidimensional knapsack problem. *Journal of the Operational Research Society*, 55(12):1323–1332, 2003.

Nathalie HOSTIOU, Nathalie CIALDELLA, Vincent VAZQUEZ, Artur Gustavo MÜLLER et Pierre Yves LE GAL : Work organization on smallholder dairy farms : a process unique to each farm. *Tropical Animal Health and Production*, 47(7):1271–1278, 2015.

Wen-Lian Hsu : On the General Feasibility Test of Scheduling Lot Sizes for Several Products on One Machine. *Management Science*, 29(1):93–105, 1983.

Jean-Marie Huriot : *Von Thunen - Economie et Espace*. Association de Science Régionale de Langue Française, Bibliothèque de Science Régionale, edition ec édition, 1994.

Stephen John James, Christian James et Judith Evans : Modelling of food transportation systems - a review. *International Journal of Refrigeration*, 29:947–957, 2006.

Wooseung Jang et Cerry M. Klein : Supply chain models for small agricultural enterprises. *Annals of Operations Research*, 190(1):359–374, 2011.

Frédérique Janvier, Françoise Nirascou et Patrick Sillard : Le Point Sur L'occupation des sols en France. Rapport technique, Commissariat Général au Développement Durable, 2015.

Vladimir K. Kaishev, Jens Perch Nielsen et Fredrik Thuring : Optimal customer selection for cross-selling of financial services products. *Expert Systems with Applications*, 40(5):1748–1757, 2013.

Behrooz Karimi, Seyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi et John Wilson : The capacitated lot sizing problem : A review of models and algorithms. *Omega*, 31(5):365–378, 2003.

Mehdi Karimi-Nasab et Mohammad Seyedhoseini : Multi-level lot sizing and job shop scheduling with compressible process times : A cutting plane approach. *European Journal of Operational Research*, 231(3):598–616, 2013.

Richard M. Karp : Reductibility among combinatorial problems. *In Complexity of Computer Computations*, volume 1, pages 85–103. 1972.

Willem K. Klein Haneveld et a. W. Stegeman : Crop succession requirements in agricultural production planning. *European Journal of Operational Research*, 166:406–429, 2005.

Jonghan Ko, Giovanni Piccinni et Evelyn Steglich : Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 96(9):1323–1331, 2009.

Dominique Laureau et Xavier Laureau : Site des Fermes de Gally, 2016. URL `http://www.groupe.gally.com/{_}histoire-dates-cles-gally`.

Xavier Laureau, Nicolas Brulard, Pierre Darmet et Alexis Lefebvre : *Les 101 mots de l'agriculture urbaine à l'usage de tous*. Archibooks, 2016.

Marie-Anne Le Dain : *Développement de produit nouveau avec les fournisseurs : les didascalies d'une collaboration performante*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes, 2015.

Pierre-Yves Le Gal, Patrick Dugué, Guy Faure et Sandra Novak : How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level ? A review. *Agricultural Systems*, 104(9):714–728, 2011.

Pierre-Yves Le Gal, Anne Merot, Charles-Henry Moulin, Mireille Navarrete et Jacques Wery : A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, 25(2):258–268, 2009.

Shu Hsien Liao, Yin Ju Chen et Hsin Hua Hsieh : Mining customer knowledge for direct selling and marketing. *Expert Systems with Applications*, 38(5):6059–6069, 2011.

Timothy J Lowe et Paul V Preckel : Decision Technologies for Agribusiness Problems : A Brief Review of Selected Literature and a Call for Research Decision Technologies for Agribusiness Problems : A Brief Review of Selected Literature and a Call for Research. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(3):201–208, 2004.

Marilyn T. Lucas et Dilip Chhajed : Applications of location analysis in agriculture : a survey. *Journal of the Operational Research Society*, 55(6):561–578, 2004.

Matthias Lütke Entrup, Hans-Otto Günther, Paul Van Beek, Martin Grunow et Thorben Seiler : Mixed-Integer Linear Programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production. *International Journal of Production Research*, 43(23):5071–5100, 2005.

Silvano Martello et Paolo Toth : *Knapsack problems : algorithms and computer implementations*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.

Guillaume Martin, Benoît Felten et Michel Duru : Forage rummy : A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling and Software*, 26 (12):1442–1453, 2011.

Guillaume Martin et Marie-Angélina Magne : Agricultural diversity to increase adaptive capacity and reduce vulnerability of livestock systems against weather variability - A farm-scale simulation study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199(September 2016):301–311, 2015.

Marcel Mazoyer et Laurence Roudart : *Histoire des agricultures du monde : Du néolithique à la crise contemporaine*. Seuil, 2002.

Robert L. McCown : Changing systems for supporting farmers decisions : paradigms, problems, and prospects. *Agricultural Systems*, 74(1):179–220, 2002.

Aurélie Merle et Mathilde Piotrowski : Consommer des produits alimentaires locaux : comment et pourquoi ? *Décisions Marketing*, 67:37–48, 2012.

Pierre Moreau, Laurent Ruiz, Françoise Vertès, Christine Baratte, Luc Delaby, Philippe Faverdin, Chantal Gascuel-Odoux, Benoit Piquemal, Eric Ramat, Jordy Salmon-Monviola et Patrick Durand : CASIMOD'N : An agro-hydrological distributed model of catchment-scale nitrogen dynamics integrating farming system decisions. *Agricultural Systems*, 118:41–51, 2013.

Luc Mougeot : Urban agriculture : definitions, presence, potentials and risks. *Growing cities, growing foods : urban agriculture on the policy agenda*, pages 1–42, 2000.

Paule Moustier et Alain Mbaye : L'agriculture urbaine dakaroise. Rapport technique, Document préparé pour ETC/GTZ, 1999.

Josefa Mula, David Peidro, Manuel Díaz-Madroñero et Eduardo Vicens : Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3):377–390, 2010.

Steven Nahmias : Perishable inventory theory : a review. *Operations research*, 30(4):680–708, 1982.

Thomas Nemecek, Frank Hayer, Emmanuel Bonnin, Benoît Carrouée, Anne Schneider et Christophe Vivier : Designing eco-efficient crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. *European Journal of Agronomy*, 65:40–51, 2015.

Maxime Ogier, Van-Dat Cung et Julien Boissière : Service network design in short and local fresh food supply chain. *RAIRO - Operations Research*, 47(4):445–464, 2013. ISSN 0399-0559.

María A. Osorio, Fred Glover et Peter Hammer : Cutting and Surrogate Constraint Analysis for Improved Multidimensional Knapsack Solutions. *Annals of Operations Research*, 117(1-4):71–93, 2002.

Ana Osvald et Lidija Zadnik : A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, 85:285–295, 2008.

Robert E. Paull : Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. *Post-harvest Biology and Technology*, 15:263–277, 1999.

Michel PHLIPPONEAU : *La vie rurale de la banlieue parisienne.* Thèse de doctorat, Centre d'Etudes Economiques Paris, 1956.

Michael L. PINEDO : *Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems*. Springer, 4th editio édition, 2012. ISBN 978-1-4614-1986-0.

Jeanne POURIAS, Christine AUBRY et Eric DUCHEMIN : Is food a motivation for urban gardeners ? Multifunctionality and the relative importance of the food function in urban collective gardens of Paris and Montreal. *Agriculture and Human Values*, 33(2):257–273, 2016. ISSN 15728366.

Didit Okta PRIBADI et Stephan PAULEIT : Peri-urban agriculture in Jabodetabek Metropolitan Area and its relationship with the urban socioeconomic system. *Land Use Policy*, 55(2016):265–274, 2016.

Marius RADULESCU, Constanta Zoie RADULESCU et Gheorghiță ZBAGANU : A portfolio theory approach to crop planning under environmental constraints. *Annals of Operations Research*, (2014):243–264, 2011.

Valeria RIZZO et Giuseppe MURATORE : Effects of packaging on shelf life of fresh celery. *Journal of Food Engineering*, 90(1):124–128, 2009.

ROADEF : *La Recherche Opérationnelle en France*. 2011.

Daniel RODRIGUEZ, Howard COX, Peter DEVOIL et Brendan POWER : A participatory whole farm modelling approach to understand impacts and increase preparedness to climate change in Australia. *Agricultural Systems*, 126(2014):50–61, 2014.

Michael E. SALASSI, Michael a. DELIBERTO et Kurt M. GUIDRY : Economically optimal crop sequences using risk-adjusted network flows : Modeling cotton crop rotations in the southeastern United States. *Agricultural Systems*, 118:33–40, 2013.

Abdelkader SBIHI : A best first search exact algorithm for the Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 13(4):337–351, 2007.

Martin SCHÖNHART, Erwin SCHMID et Uwe A. SCHNEIDER : CropRota - A crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy*, 34(4):263–277, 2011.

Michel SEBILLOTTE : Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers de l'ORSTOM*, 24:3–25, 1974.

Aristide Wendyam SEMPORE, Nadine ANDRIEU, Hassan Bismarck NACRO, Michel SEDOGO et Pierre-Yves Le GAL : Relevancy and role of whole-farm models in supporting smallholder farmers in planning their agricultural season. *Environmental Modelling and Software*, 68:147–155, 2015.

Wei SHIH : A Branch and Bound Method for the Multiconstraint Zero-One Knapsack Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 30(4):369–378, 1979.

Manish SHUKLA et Sanjay JHARKHARIA : Agri-fresh produce supply chain management : a state-of-the-art literature review. *International Journal of Operations & Production Management*, 33 (2):114–158, 2013.

Huan Jyh SHYUR et Hsu Shih SHIH : A hybrid MCDM model for strategic vendor selection. *Mathematical and Computer Modelling*, 44(7-8):749–761, 2006.

Amol SINGH : Supplier evaluation and demand allocation among suppliers in a supply chain. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 20(3):167–176, 2014.

Henning T. SØGAARD et Claus G. SØRENSEN : A model for optimal selection of machinery sizes within the farm machinery system. *Biosystems Engineering*, 89(1):13–28, 2004.

Claus G. Sørensen, Niels A. Madsen et Brian H. Jacobsen : Organic farming scenarios : Operational analysis and costs of implementing innovative technologies. *Biosystems Engineering*, 91(2):127–137, 2005.

Wladimir E. Soto-Silva, Esteve Nadal-Roig, Marcela C. González-Araya et Lluis M. Pla-Aragones : Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research*, 251(2):345–355, 2016.

Christophe-Toussaint Soulard et Christine Aubry : Cultiver les milieux habités : quelle agronomie en zone urbaine ? *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 1(2):89–101, 2011.

Claudio O. Stockle, Marcello Donatelli et Roger Nelson : CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18:289–307, 2003.

Naoum K. Tsolakis, Christos A. Keramydas, Agorasti K. Toka, Dimitrios A. Aidonis et Eleftherios T. Iakovou : Agrifood supply chain management : A comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems Engineering*, 120:47–64, 2014.

Wolfgang Ulaga, Arun Sharma et R. Krishnan : Plant location and place marketing : Understanding the process from the business customer's perspective. *Industrial Marketing Management*, 31(5):393–401, 2002.

Jack van der Vorst, Seth-Oscar Tromp et Durk-Jouke van der Zee : Simulation modelling for food supply chain redesign ; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47(23):6611–6631, 2009. ISSN 0020-7543.

Magali Verdonck, Michèle Taymas, Gauthier Chapelle, Gaëtan Dartevelle et Caroline Zaoui : Système d'alimentation durable - Potentiel d'emplois en Région de Bruxelles-Capitale. pages 1–115, 2014.

Cor Verdouw, Adrie Beulens, Jacques Trienekens et Sjaak Wolfert : Process modelling in demand-driven supply chains : A reference model for the fruit industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(2):174–187, 2010.

Pieter Vereijken : A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Developments in Crop Science*, 25(C):293–308, 1997.

Armand Wallon, Marcel Le Glay et Georges Duby : *Histoire de la France rurale, tome 1 : Des origines à 1340*. Seuil, 1992.

Georges Emile Weil : *L'hôpital au service du malade : transfert des concepts, des méthodes, des outils de la gestion de la production*. Thèse de doctorat, Université scientifique technologique et médicale de Grenoble, 1990.

Anton Wetzstein, Evi Hartmann, W C Benton Jr et Nils-Ole Hohenstein : A systematic assessment of supplier selection literature – state-of-the-art and future scope. *Intern. Journal of Production Economics*, 182:304–323, 2016.

Jimmy R. Williams, Charles Allan Jones et Paul T. Dyke : A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 27(1):0129–0144, 1984.

Cleve Willis et William Hanlon : Temporal model for long-run orchard decisions. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 24(3):17–28, 1976.

Sjaak Wolfert, Lan Ge, Cor Verdouw et Marc Jeroen Bogaardt : Big Data in Smart Farming - A review. *Agricultural Systems*, 153:69–80, 2017. ISSN 0308521X.

Simon WOODWARD, Alvaro ROMERA, Warner Brod. BESKOW et Simon LOVATT : Better simulation modelling to support farming systems innovation : Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agriculturals*, 51(May 2007):235–252, 2008.

Annexes

Annexe 1 : Résultats des instances du chapitre 4 Sélection des clients

Les trois tables suivantes présentent la diversité des solutions générées pour les instances testées sur le modèle de sélection des clients. Pour chaque instance, différents pas de temps sont testés. Nous donnons dans les tables les caractéristiques des instances, les temps de calcul, l'objectif atteint, ainsi que les revenus associés à chacun des clients sélectionnés.

Num	prod	nbP	MO	nbT	AR	EL	Tps CPU	Revenu	rWS0	rWS1	rFM0	rFM1	rFM2	rFM3	rCSA0	rCSA1	rCSA2	rCD0	rCD1	rPR0
1	1	40	4	52	0	0	11.60	662 927	393 495	103 139	113 862				52 509					
2	1	40	4	52	0	1	19.38	924 051	142 942	13 580		104 476	259 593	506 371	52 509	33 074	21 285			
3	1	40	4	52	1	0	9.56	662 927	393 495	103 139	113 862				52 509					
4	1	40	4	52	1	1	19.34	924 051	142 942	13 580		104 476	259 593	506 371	52 509	33 074	21 285			
5	1	40	4	91	0	0	11.42	666 071	442 893	116 447					52 509	33 074	21 285			
6	1	40	4	91	0	1	112.04	895 527	190 363	24 575			273 746	496 151	52 509	33 074	21 285			
7	1	40	4	91	1	0	11.41	666 071	442 893	116 447					52 509	33 074	21 285			
8	1	40	4	91	1	1	111.79	895 527	190 363	24 575			273 746	496 151	52 509	33 074	21 285			
9	1	40	8	52	0	0	9.54	762 758	344 829	76 627		234 478			52 509	33 074	21 285			
10	1	40	8	52	0	1	16.95	959 903	142 694	13 220		104 815	259 358	506 325	52 509	33 074	21 285			
11	1	40	8	52	1	0	7.96	762 758	344 829	76 627		234 478			52 509	33 074	21 285			
12	1	40	8	52	1	1	17.26	959 903	142 694	13 220		104 815	259 358	506 325	52 509	33 074	21 285			
13	1	40	8	91	0	0	21.86	694 494	371 664	104 044	112 617				52 509	33 074	21 285			
14	1	40	8	91	0	1	98.62	931 036	143 244	14 628		102 609	269 110	493 259	52 509	33 074	21 285			
15	1	40	8	91	1	0	21.90	694 494	371 664	104 044	112 617				52 509	33 074	21 285			
16	1	40	8	91	1	1	99.18	931 036	143 244	14 628		102 609	269 110	493 259	52 509	33 074	21 285			
17	1	40	16	52	0	0	34.91	908 693	206 514	131 014				519 094	52 509					
18	1	40	16	52	0	1	22.22	1 033 781	141 422	15 442		104 891	259 374	506 358	52 509	33 074	21 285			
19	1	40	16	52	1	0	32.63	908 693	206 514	131 014				519 094	52 509					
20	1	40	16	52	1	1	21.90	1 033 781	141 422	15 442		104 891	259 374	506 358	52 509	33 074	21 285			
21	1	40	16	91	0	0	148.17	785 147	301 592	67 524	90 810	218 780			52 509	33 074	21 285			
22	1	40	16	91	0	1	99.99	1 004 350	190 735	24 276			273 782	496 038	52 509	33 074	21 285			
23	1	40	16	91	1	0	146.51	785 147	301 592	67 524	90 810	218 780			52 509	33 074	21 285			
24	1	40	16	91	1	1	100.39	1 004 350	190 735	24 276			273 782	496 038	52 509	33 074	21 285			
25	1	73	4	52	0	0	18.40	838 832	473 534	138 848	174 207				52 509					
26	1	73	4	52	0	1	25.90	1 215 600	182 545	21 054		119 647	298 671	697 493	52 509	33 074	21 285			
27	1	73	4	52	1	0	18.31	838 832	473 534	138 848	174 207				52 509					
28	1	73	4	52	1	1	25.90	1 215 600	182 545	21 054		119 647	298 671	697 493	52 509	33 074	21 285			
29	1	73	4	91	0	0	22.56	820 977	564 602	149 648					52 509	33 074	21 285			
30	1	73	4	91	0	1	103.20	1 181 996	182 411	20 569		118 442	315 518	677 443	52 509	33 074	21 285			
31	1	73	4	91	1	0	22.39	820 977	564 602	149 648					52 509	33 074	21 285			
32	1	73	4	91	1	1	101.17	1 181 996	182 411	20 569		118 442	315 518	677 443	52 509	33 074	21 285			
33	1	73	8	52	0	0	15.46	951 056	416 305	96 031		332 339			52 509	33 074	21 285			
34	1	73	8	52	0	1	24.72	1 247 255	181 095	18 168		119 517	298 637	697 185	52 509	33 074	21 285			
35	1	73	8	52	1	0	15.69	951 056	416 305	96 031		332 339			52 509	33 074	21 285			
36	1	73	8	52	1	1	24.66	1 247 255	181 095	18 168		119 517	298 637	697 185	52 509	33 074	21 285			
37	1	73	8	91	0	0	41.46	869 767	493 887	127 297	163 161				52 509	33 074				
38	1	73	8	91	0	1	105.79	1 224 245	180 904	23 094		118 499	315 498	679 255	52 509	33 074	21 285			
39	1	73	8	91	1	0	40.99	869 767	493 887	127 297	163 161				52 509	33 074				
40	1	73	8	91	1	1	102.48	1 224 260	180 907	23 096		118 496	315 502	679 265	52 509	33 074	21 285			
41	1	73	16	52	0	0	59.79	1 164 363	148 928	258 421				704 700	52 509					
42	1	73	16	52	0	1	23.70	1 324 785	182 944	20 863		119 609	298 590	697 482	52 509	33 074	21 285			
43	1	73	16	52	1	0	60.33	1 164 363	148 928	258 421				704 700	52 509					
44	1	73	16	52	1	1	23.90	1 324 785	182 944	20 863		119 609	298 590	697 482	52 509	33 074	21 285			
45	1	73	16	91	0	0	304.87	984 815	367 630	89 705	115 645	305 507			52 509	33 074	21 285			
46	1	73	16	91	0	1	133.64	1 297 263	180 864	23 296		118 472	315 344	679 407	52 509	33 074	21 285			
47	1	73	16	91	1	0	309.58	983 686	367 692	89 385	119 781	300 504			52 509	33 074	21 285			
48	1	73	16	91	1	1	133.39	1 297 263	180 864	23 296		118 472	315 344	679 407	52 509	33 074	21 285			

FIGURE 3 – *Temps de résolution (Tps CPU), valeur de la fonction objectif à l'optimum (Revenu) et revenus tirés des différents marchés pour les instances testées. Tableau 1/3*

Num	prod	nbP	MO	nbT	AR	EL	Tps CPU	Revenu	rWS0	rWS1	rFM0	rFM1	rFM2	rFM3	rCSA0	rCSA1	rCSA2	rCD0	rCD1	rPR0
49	2	40	4	52	0	0	9.34	1 166 185	626 765	374 390	113 843				52 509					
50	2	40	4	52	0	1	11.43	1 558 632	361 905	174 493	60 366	144 111	385 919	558 940	52 509	33 074	21 285			
51	2	40	4	52	1	0	8.06	1 166 185	626 765	374 390	113 843				52 509					
52	2	40	4	52	1	1	13.05	1 558 632	361 905	174 493	60 366	144 111	385 919	558 940	52 509	33 074	21 285			
53	2	40	4	91	0	0	16.77	1 165 662	666 954	393 835					52 509	33 074	21 285			
54	2	40	4	91	0	1	38.02	1 511 514	371 325	198 334		142 303	380 577	550 293	52 509	33 074	21 285			
55	2	40	4	91	1	0	12.72	1 165 662	666 954	393 835					52 509	33 074	21 285			
56	2	40	4	91	1	1	37.68	1 511 514	371 325	198 334		142 303	380 577	550 293	52 509	33 074	21 285			
57	2	40	8	52	0	0	9.54	1 274 738	586 579	341 072		241 105			52 509	33 074	21 285			
58	2	40	8	52	0	1	12.54	1 594 780	361 913	174 570	60 468	144 114	384 869	559 561	52 509	33 074	21 285			
59	2	40	8	52	1	0	8.15	1 274 738	586 579	341 072		241 105			52 509	33 074	21 285			
60	2	40	8	52	1	1	10.45	1 594 791	361 913	174 578	60 622	143 957	384 878	559 559	52 509	33 074	21 285			
61	2	40	8	91	0	0	18.65	1 197 240	626 984	372 039	114 362				52 509	33 074				
62	2	40	8	91	0	1	45.15	1 555 550	373 072	203 277		142 474	380 785	550 724	52 509	33 074	21 285			
63	2	40	8	91	1	0	18.92	1 197 240	626 984	372 039	114 362				52 509	33 074				
64	2	40	8	91	1	1	42.49	1 555 552	372 723	203 620		142 348	380 948	550 683	52 509	33 074	21 285			
65	2	40	16	52	0	0	51.47	1 414 775	530 734	318 607				566 197						
66	2	40	16	52	0	1	10.32	1 668 118	358 666	178 512	64 604	139 598	384 547	559 905	52 509	33 074	21 285			
67	2	40	16	52	1	0	49.06	1 414 775	530 734	318 607				566 197						
68	2	40	16	52	1	1	12.80	1 668 118	358 666	178 512	64 604	139 598	384 547	559 905	52 509	33 074	21 285			
69	2	40	16	91	0	0	25.82	1 293 337	526 587	342 545	105 385	234 550			52 509	33 074				
70	2	40	16	91	0	1	43.31	1 628 513	375 743	200 830		142 490	380 772	550 703	52 509	33 074	21 285			
71	2	40	16	91	1	0	25.83	1 293 337	526 587	342 545	105 385	234 550			52 509	33 074				
72	2	40	16	91	1	1	43.06	1 628 513	375 743	200 830		142 490	380 772	550 703	52 509	33 074	21 285			
73	2	73	4	52	0	0	54.65	1 447 913	785 512	424 395	189 723				52 509					
74	2	73	4	52	0	1	16.38	2 047 154	423 041	225 777	71 464	159 560	482 429	812 625	52 509	33 074	21 285			
75	2	73	4	52	1	0	54.05	1 447 913	785 512	424 395	189 723				52 509					
76	2	73	4	52	1	1	16.32	2 047 154	423 041	225 777	71 464	159 560	482 429	812 625	52 509	33 074	21 285			
77	2	73	4	91	0	0	24.93	1 427 779	853 199	471 511					52 509	33 074	21 285			
78	2	73	4	91	0	1	58.10	2 002 444	439 147	255 738		164 524	476 691	798 468	52 509	33 074	21 285			
79	2	73	4	91	1	0	24.78	1 427 779	853 199	471 511					52 509	33 074	21 285			
80	2	73	4	91	1	1	59.04	2 002 444	439 147	255 738		164 524	476 691	798 468	52 509	33 074	21 285			
81	2	73	8	52	0	0	21.28	1 593 280	721 165	403 128		364 744			52 509	33 074	21 285			
82	2	73	8	52	0	1	16.07	2 083 703	423 070	225 564	69 811	161 565	482 400	812 622	52 509	33 074	21 285			
83	2	73	8	52	1	0	21.17	1 593 280	721 165	403 128		364 744			52 509	33 074	21 285			
84	2	73	8	52	1	1	16.12	2 083 703	423 070	225 564	69 811	161 565	482 400	812 622	52 509	33 074	21 285			
85	2	73	8	91	0	0	40.08	1 487 400	786 859	440 876	177 459				52 509	33 074				
86	2	73	8	91	0	1	57.90	2 038 663	439 139	255 801		164 258	476 770	798 423	52 509	33 074	21 285			
87	2	73	8	91	1	0	40.19	1 487 400	786 859	440 876	177 459				52 509	33 074				
88	2	73	8	91	1	1	58.39	2 038 663	439 139	255 801		164 258	476 770	798 423	52 509	33 074	21 285			
89	2	73	16	52	0	0	111.17	1 828 658	611 280	398 042				822 159						
90	2	73	16	52	0	1	15.44	2 156 585	423 083	225 658	69 164	162 237	482 355	812 617	52 509	33 074	21 285			
91	2	73	16	52	1	0	111.30	1 828 658	611 280	398 042				822 159						
92	2	73	16	52	1	1	15.25	2 156 585	423 083	225 658	69 164	162 237	482 355	812 617	52 509	33 074	21 285			
93	2	73	16	91	0	0	66.50	1 621 724	632 540	410 228	143 400	353 241			52 509	33 074				
94	2	73	16	91	0	1	64.71	2 111 290	441 865	254 145		163 841	475 987	798 473	52 509	33 074	21 285			
95	2	73	16	91	1	0	66.81	1 621 724	632 540	410 228	143 400	353 241			52 509	33 074				
96	2	73	16	91	1	1	64.85	2 111 290	441 865	254 145		163 841	475 987	798 473	52 509	33 074	21 285			

FIGURE 4 – *Temps de résolution (Tps CPU), valeur de la fonction objectif à l'optimum (Revenu) et revenus tirés des différents marchés pour les instances testées. Tableau 2/3*

Num	prod	nbP	MO	nbT	AR	EL	Tps CPU	Revenu	rWS0	rWS1	rFM0	rFM1	rFM2	rFM3	rCSA0	rCSA1	rCSA2	rCD0	rCD1	rPR0
97	3	40	4	52	0	0	6.81	2 184 808	1 317 483	804 069					52 509	33 074	21 285			
98	3	40	4	52	0	1	7.62	2 876 338	1 018 595	611 122	100 607	226 754	476 597	604 941	52 509	33 074	21 285			
99	3	40	4	52	1	0	5.64	2 184 808	1 317 483	804 069					52 509	33 074	21 285			
100	3	40	4	52	1	1	10.47	2 876 338	1 018 595	611 122	100 607	226 754	476 597	604 941	52 509	33 074	21 285			
101	3	40	4	91	0	0	11.52	2 181 449	1 306 786	804 414					52 509	33 074	21 285			
102	3	40	4	91	0	1	32.37	2 856 092	1 041 207	614 974	98 398	219 865	471 828	596 555	52 509	33 074	21 285			
103	3	40	4	91	1	0	11.46	2 181 449	1 306 786	804 414					52 509	33 074	21 285			
104	3	40	4	91	1	1	29.85	2 856 092	1 041 207	614 974	98 398	219 865	471 828	596 555	52 509	33 074	21 285			
105	3	40	8	52	0	0	15.11	2 325 995	1 269 629	760 221		252 302			52 509	33 074				
106	3	40	8	52	0	1	7.75	2 912 911	1 018 632	611 125	100 853	226 581	476 651	604 930	52 509	33 074	21 285			
107	3	40	8	52	1	0	14.17	2 325 995	1 269 629	760 221		252 302			52 509	33 074				
108	3	40	8	52	1	1	7.42	2 912 911	1 018 632	611 125	100 853	226 581	476 651	604 930	52 509	33 074	21 285			
109	3	40	8	91	0	0	20.11	2 246 776	1 298 440	780 392	117 103				52 509	33 074				
110	3	40	8	91	0	1	30.07	2 892 478	1 041 190	615 001	98 081	220 179	471 787	596 577	52 509	33 074	21 285			
111	3	40	8	91	1	0	20.07	2 246 776	1 298 440	780 392	117 103				52 509	33 074				
112	3	40	8	91	1	1	30.21	2 892 478	1 041 190	615 001	98 081	220 179	471 787	596 577	52 509	33 074	21 285			
113	3	40	16	52	0	0	32.31	2 525 072	1 225 717	731 135			500 081		52 509	33 074	21 285			
114	3	40	16	52	0	1	7.57	2 985 424	1 018 489	611 116	100 809	226 272	476 818	604 967	52 509	33 074	21 285			
115	3	40	16	52	1	0	32.31	2 525 072	1 225 717	731 135			500 081		52 509	33 074	21 285			
116	3	40	16	52	1	1	9.97	2 985 424	1 018 489	611 116	100 809	226 272	476 818	604 967	52 509	33 074	21 285			
117	3	40	16	91	0	0	23.23	2 372 473	1 152 779	804 026	114 972	248 235			52 509	33 074				
118	3	40	16	91	0	1	32.23	2 965 294	1 041 200	614 984	97 871	220 390	471 827	596 556	52 509	33 074	21 285			
119	3	40	16	91	1	0	23.47	2 372 473	1 152 779	804 026	114 972	248 235			52 509	33 074				
120	3	40	16	91	1	1	29.46	2 965 294	1 041 200	614 984	97 871	220 390	471 827	596 556	52 509	33 074	21 285			
121	3	73	4	52	0	0	12.50	No solution												
122	3	73	4	52	0	1	13.25	3 746 567	1 246 806	680 810	133 612	300 424	642 554	919 950	52 509	33 074	21 285			
123	3	73	4	52	1	0	12.62	No solution												
124	3	73	4	52	1	1	13.32	3 746 567	1 246 806	680 810	133 612	300 424	642 554	919 950	52 509	33 074	21 285			
125	3	73	4	91	0	0	33.71	2 718 788	1 728 280	951 745					52 509	33 074				
126	3	73	4	91	0	1	59.37	3 726 990	1 277 785	682 931	127 181	291 224	641 266	905 416	52 509	33 074	21 285			
127	3	73	4	91	1	0	34.07	2 718 788	1 728 280	951 745					52 509	33 074				
128	3	73	4	91	1	1	59.38	3 726 990	1 277 785	682 931	127 181	291 224	641 266	905 416	52 509	33 074	21 285			
129	3	73	8	52	0	0	46.89	2 890 125	1 629 173	865 055		399 888			52 509					
130	3	73	8	52	0	1	13.28	3 783 047	1 246 843	680 793	132 968	301 096	642 650	919 885	52 509	33 074	21 285			
131	3	73	8	52	1	0	46.39	2 890 125	1 629 173	865 055		399 888			52 509					
132	3	73	8	52	1	1	15.84	3 783 047	1 246 843	680 793	132 968	301 096	642 650	919 885	52 509	33 074	21 285			
133	3	73	8	91	0	0	35.30	2 797 125	1 674 259	904 831	190 142				52 509		21 285			
134	3	73	8	91	0	1	51.14	3 763 252	1 278 065	682 482	127 172	291 252	641 328	905 307	52 509	33 074	21 285			
135	3	73	8	91	1	0	35.43	2 797 125	1 674 259	904 831	190 142				52 509		21 285			
136	3	73	8	91	1	1	51.49	3 763 252	1 278 065	682 482	127 172	291 252	641 328	905 307	52 509	33 074	21 285			
137	3	73	16	52	0	0	59.86	3 200 631	1 569 019	820 313			758 384		52 509	33 074	21 285			
138	3	73	16	52	0	1	12.89	3 855 793	1 246 794	680 852	133 797	300 249	642 545	919 948	52 509	33 074	21 285			
139	3	73	16	52	1	0	62.27	3 200 624	1 569 020	820 308			758 384		52 509	33 074	21 285			
140	3	73	16	52	1	1	12.93	3 855 793	1 246 794	680 852	133 797	300 249	642 545	919 948	52 509	33 074	21 285			
141	3	73	16	91	0	0	57.62	2 988 754	1 581 986	845 938	165 791	386 284			52 509					
142	3	73	16	91	0	1	54.51	3 836 110	1 278 071	682 591	127 186	291 198	641 244	905 414	52 509	33 074	21 285			
143	3	73	16	91	1	0	55.71	2 988 754	1 581 986	845 938	165 791	386 284			52 509					
144	3	73	16	91	1	1	54.55	3 836 110	1 278 071	682 591	127 186	291 198	641 244	905 414	52 509	33 074	21 285			

FIGURE 5 – *Temps de résolution (Tps CPU), valeur de la fonction objectif à l'optimum (Revenu) et revenus tirés des différents marchés pour les instances testées. Tableau 1/3*

Annexe 2 : Publications

Articles de revues

N. Brulard, V.-D. Cung et N. Catusse, 2017. An integrated sizing and planning problem in designing urban farming systems. *International Journal of Production Research*. (soumis, en revue en décembre 2017).

Communications avec actes répertoriés dans les bases de données internationales

N. Brulard, V.-D. Cung et N. Catusse, 2017. Client selection and combination for farm perishable products. 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Toulouse, France. 9-14 Juillet. IFAC 2017 Proceedings.

M.S. Belaid, N. Brulard, V.-D. Cung et G. Lafosse, 2017. Assessing and analyzing added value on middle food supply chain systems using Value-Stream Mapping tool, a case study in France. EFITA 2017, Montpellier, France.

N.Brulard, V.-D. Cung et N. Catusse, 2015. Strategic and tactical Urban Farm design, a conception and sizing problem. In *Proceedings of FSD5 5th International Symposium for Farming Systems Design*, Montpellier, France.

Communications avec actes non-répertoriés dans les bases de données internationales

N. Brulard, V.-D. Cung et N. Catusse, 2016. Intégration de l'ordonnancement de tâches avec coûts et temps de lancement séquence-dépendants dans le dimensionnement stratégique d'une exploitation agricole maraîchère. In *ROADEF - 17ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, pages 1–2. Compiègne, France

N. Brulard, V.-D. Cung et N. Catusse, 2015. Conception de systèmes de production agricoles urbains, un problème de dimensionnement et d'affectation de ressources.In *ROADEF - 16ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, pages 1–2. Marseille, France.

Communications orales sans actes dans un congrès

V.-D. Cung, N. Brulard, C. Corbière, G. Lafosse, 2016. Des circuits courts alimentaires aux fermes urbaines : une chaîne logistique à (re-)concevoir. *22èmes journées STP du GDR MACS*, Grenoble, France.

V.-D. Cung, N. Brulard, N. Catusse, C. Dutrieux, 2016. Optimizing the urban farming system design problem. *29th Conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization*, Budapest, Hungary.