



HAL
open science

Optimisation et simulation d'une chaîne logistique : application au secteur de l'agriculture

Valeria Borodin

► **To cite this version:**

Valeria Borodin. Optimisation et simulation d'une chaîne logistique: application au secteur de l'agriculture. Recherche opérationnelle [math.OA]. Université de Technologie de Troyes, 2014. Français. NNT: 2014TROY0034. tel-03358776

HAL Id: tel-03358776

<https://theses.hal.science/tel-03358776>

Submitted on 29 Sep 2021

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.

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Valeria BORODIN

**Optimisation et simulation
d'une chaîne logistique :
application au secteur de l'agriculture**

Spécialité :
Optimisation et Sûreté des Systèmes

2014TROY0034

Année 2014

THESE

pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR de l'UNIVERSITE
DE TECHNOLOGIE DE TROYES
Spécialité : OPTIMISATION ET SURETE DES SYSTEMES**

présentée et soutenue par

Valeria BORODIN

le 1^{er} décembre 2014

**Optimisation et simulation d'une chaîne logistique :
application au secteur de l'agriculture**

JURY

M. B. GRABOT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. S. DAUZÈRE-PÉRÈS	PROFESSEUR ENSM SAINT ETIENNE	Rapporteur
M. Y. FREIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. F. HNAIEN	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
Mme N. LABADIE	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directrice de thèse
M. O. NAUD	INGENIEUR DE RECHERCHE	Examineur

Personnalités invitées

M. J. BOURTEMBOURG	INGENIEUR AGRICOLE
M. J.-P. NICOLETTI	CHARGE DES ETUDES ECONOMIQUES

à Elisabeth Papa

Remerciements

Avant d'entamer la présentation du travail réalisé au cours de trois années, tout d'abord, je voudrais remercier l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour avoir rendu possible cette thèse CIFRE, collaboration entre la Société Coopérative Agricole de la Région d'Arcis-sur-Aube (SCARA), l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et l'Institut du Végétal Arvalis (ARVALIS).

Ma reconnaissance se porte vers Messieurs Stéphane Dauzère-Pères, Professeur à l'École des Mines de Saint-Étienne et Yannick Frein, Professeur des Universités à l'Institut Polytechnique de Grenoble, pour l'honneur qu'ils me font en ayant accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Que Messieurs Bernard Grabot, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et Olivier Naud, Ingénieur de Recherche à l'IRSTEA, me permettent de leur exprimer ma gratitude pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit et pour leur participation au jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance, à Jean Bourtembourg, mon responsable en entreprise, pour l'aide et les conseils pertinents concernant les missions évoquées dans ce mémoire, ainsi que pour son intérêt et le soutien qu'il m'a accordés. J'adresse également mes remerciements à la directrice Agnès Duwer pour son accueil chaleureux et la confiance qu'elle m'a accordés dès mon arrivée.

Toute ma gratitude s'adresse à mes directeurs de thèse, Nacima Labadie et Faicel Hnaien, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser cette thèse et m'ont encadrée au cours de ces trois années. Je les remercie tout particulièrement pour leur disponibilité, leur aide scientifique et pour m'avoir aiguillée dans mes travaux de recherche. Leurs connaissances, leurs expertises, leurs conseils constructifs et avisés m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie l'équipe ARVALIS pour sa collaboration au cours de ces années. Ses connaissances et son expertise dans le domaine des grandes cultures ont facilité mes tâches et m'ont permis de découvrir le domaine de l'agronomie céréalière.

Je souhaite mentionner le plaisir que j'ai eu de passer la plupart de mon temps au sein de la SCARA et remercier l'ensemble du personnel pour son accueil sympathique, ainsi que sa gentillesse tout au long de ces trois années de thèse, et tout spécialement à Céline G., Laurence, Francis, Francine, Catherine, Françoise, Laurent, Céline P., Cédric, Bernard, Philippe, Guillaume, Isabelle, Anne-Marie, Nicolas D., Nicolas M., Nicolas C., Charlotte, Christian, Benoit, Estelle, Sylvie, ... Je les remercie aussi pour leur réceptivité et leur bienveillance permanente.

Je remercie également tous les doctorants, post-doctorants et permanents du LOSI, même si je les ai trop peu croisés pendant la thèse, pour les échanges amicaux que nous avons pu avoir ensemble.

Finalement, j'adresse un immense et très sincère merci à mes parents et à ma famille, pour leur soutien inconditionnel, la confiance et fierté qu'ils me portent.

Valeria BORODIN

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	xiii
Abstract	xiv
1 Introduction générale	1
1.1 Présentation de l'entreprise	1
1.1.1 La SCARA	1
1.1.2 Les savoir-faire	2
1.2 Contexte et problématique	3
1.3 Objectifs, démarche et contributions	3
1.4 Structure de la thèse	4
2 État de l'art : management de la chaîne d'approvisionnement agricole	7
2.1 Introduction	7
2.2 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire	9
2.2.1 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits non-périssables	12
2.2.2 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits périssables	15
2.3 Chaîne d'approvisionnement agro-énergétique	19
2.4 Chaîne d'approvisionnement en aliments pour bétail	24
2.5 Chaîne d'approvisionnement en produits industriels	25
2.6 Conclusions et perspectives	26
3 Simulation de la chaîne logistique agricole	29
3.1 Introduction	29
3.2 Description de la chaîne logistique agricole	30
3.3 Modélisation de la chaîne logistique agricole	32
3.3.1 Composante physique	32
3.3.2 Composante de commande	34
3.3.3 Instanciation et paramétrage	38
3.4 Résultats numériques	41
3.5 Conclusions et perspectives	43
4 Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : cas statique	45
4.1 Introduction	45

4.2	Description du problème et modélisation mathématique	47
4.2.1	Programmation sous contraintes probabilistes jointes	48
4.2.2	Programmation mixte en nombres entiers	50
4.3	Une approche basée sur la réduction des scénarios	52
4.4	Reformulation mixte en nombres entiers et le concept de <i>pertinence</i> -($1 - \alpha$)	55
4.5	Résultats numériques	58
4.6	Conclusions et perspectives	62
5	Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : cas dynamique	65
5.1	Introduction	65
5.2	Description du problème et modélisation mathématique	66
5.3	Une approche dynamique pro-active	71
5.4	Résultats numériques	74
5.5	Conclusions et perspectives	78
6	Techniques statistiques de prévision des livraisons	79
6.1	Introduction	79
6.2	Description du problème	81
6.3	Méthodologie	83
6.3.1	Régression basée sur données de panel	83
6.3.2	Régression multivariée par spline adaptative	86
6.4	Résultats numériques	87
6.4.1	Estimation et apprentissage	88
6.4.2	Prévisions et validation	91
6.5	Conclusions	92
7	Planification des opérations de vidage des silos de collecte	93
7.1	Introduction	93
7.2	Description du problème et modélisation mathématique	95
7.3	Méthodologie de résolution	99
7.3.1	Incertitude sur les coefficients de la fonction-objectif	99
7.3.2	Incertitude sur les coefficients du second membre	100
7.3.3	Approche combinée	101
7.4	Résultats numériques	102
7.5	Conclusions et perspectives	103
8	Reconfiguration de la chaîne logistique agricole	105
8.1	Introduction	105
8.2	Couplage <i>simulation optimisation</i>	106
8.3	Vers une approche mutualisée	110
8.4	Analyse de scénarios prospectifs	112
8.5	Résultats numériques	112
8.5.1	Optimisation du système simulé	112
8.5.2	Simulation et optimisation	113
8.5.3	Analyse de performance	114
8.6	Conclusions et perspectives	115

9 Conclusions générales	117
Liste de publications	119
Annexes	121
A Étude spatialisée : système d'information géographique	121
B Chaîne logistique agricole dans la littérature : <i>statistiques</i>	124
C Classification taxonomique de céréales	125
D Intégration des logiciels ARENA et CPLEX	125
Bibliographie	127

Liste des tableaux

2.1	Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire non-périssable : liste des modèles mathématiques déterministes	14
2.2	Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire périssable : liste des modèles mathématiques déterministes	16
2.3	Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire : liste des modèles mathématiques stochastiques	17
2.4	Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire : liste des modèles mathématiques robustes	18
2.5	Chaîne d’approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques déterministes	20
2.6	Chaîne d’approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques stochastiques	21
2.7	Chaîne d’approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques robustes	22
4.1	Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : <i>notations</i>	47
4.2	Tests effectués pour une période de récolte de 10 jours	61
4.3	Tests effectués pour une période de récolte de 13 jours	62
5.1	ADP vs. SHG pour 10 instances	75
5.2	ADP vs. VOS pour 10 instances	76
6.2	Techniques statistiques de prévision des livraisons de collecte : <i>notations</i>	83
6.1	Statistiques descriptives : <i>la livraison de récolte et la météo</i>	84
6.3	Estimations des modèles de régression basée sur données de panel : <i>orge d’hiver et orge de printemps</i>	89
6.4	Estimations des modèles de régression basée sur données de panel : <i>blé d’hiver et colza</i>	90
6.5	Prévisions hors-échantillon (2013) basées sur un échantillon de 8 campagnes agricoles (2005-2012) pour l’orge de printemps et l’orge d’hiver : <i>qualité d’ajustement</i>	91
6.6	Prévisions hors-échantillon (2013) basées sur un échantillon de 8 campagnes agricoles (2005-2012) pour le blé d’hiver et colza : <i>qualité d’ajustement</i>	92
7.1	Planification des opérations de vidage des silos de collecte : <i>notations</i>	96
8.1	Optimisation logistique du système simulé : <i>notations</i>	109
8.2	OptQuest : optimisation <i>via simulation</i>	113

Table des figures

1.1	SCARA : une localisation géographique au cœur de grands axes de commercialisation (Scara, 2011)	2
1.2	Savoir-faire de la SCARA (Scara, 2011)	2
1.3	Gestion de la chaîne logistique agricole : un aperçu méthodologique du système d'aide à la décision	3
2.1	Filière agricole : les principaux domaines d'utilisation	8
2.2	Chaîne logistique agricole : les principaux acteurs (Hovelaque et al., 2009; Beske et al., 2014)	8
2.3	Exploitation agricole : les décisions à prendre du stratégique à l'opérationnel (Jang and Klein, 2011)	9
3.1	Chaîne logistique agricole dans son état actuel	31
3.2	Modélisation de la chaîne logistique : <i>livraison et stockage</i>	35
3.3	Modélisation de la chaîne logistique : <i>vidage des silos de collecte</i>	35
3.4	Système de file d'attente auprès des silos de stockage	36
3.5	Modélisation de la chaîne logistique : <i>opération de séchage</i>	37
3.6	Résultats numériques : <i>activité des séchoirs</i>	39
3.7	Résultats numériques : <i>activité de stockage</i>	40
3.8	Résultats numériques : <i>file d'attente à un silo de stockage</i>	41
3.9	Résultats numériques : <i>évolution des risques cumulés de dégradation de la qualité des céréales collectées</i>	42
3.10	Résultats numériques : <i>le taux d'utilisation d'un chantier agricole</i>	42
4.1	Résultats relatifs à $\mathcal{P}(4.2.1)$ pour un horizon de temps de 10 jours : <i>temps de calcul</i>	60
5.1	Un aperçu du processus de prise de décisions multi-étapes à horizon glissant	68
5.12	Approche dynamique pro-active : expérimentations numériques pour 10 instances	77
6.1	Dispersion géographique des stations météorologiques et des silos de stockage	81
6.2	Les quantités journalières totales livrées au silo 3 durant les campagnes agricoles datant de 2005 à 2013	82
7.1	(7.22) vs. (7.23)	102
7.2	(7.23) vs. (7.24)	102
8.1	Optimisation <i>via</i> simulation (Fu, 2002; Kleijnen and Wan, 2007)	107
8.2	Simulation pour optimisation (Fu, 2002)	107

8.3	Simulation et optimisation	108
8.4	Vers une approche mutualisée	110
8.5	Chaîne logistique alternative : transfert direct entre les champs et les silos d'expédition	111
8.6	Expérimentation numérique : simulation et optimisation	113
8.7	Expérimentation numérique : analyse de scénarios correspondant à la fermeture d'un seul silo de collecte	114
8.8	Expérimentation numérique : analyse de scénarios correspondant à la fermeture de deux silos de collecte	114
8.9	Expérimentation numérique : chaîne logistique actuelle vs. chaîne logistique alternative	115
A.1	Carte illustrant le périmètre concerné par la coopérative sous-étude	122
A.2	Campagne agricole 2014 : <i>répartition géographique des cultures semées</i>	123
A.3	Campagne agricole 2014 : <i>qualité de blé selon l'indice de chute de Hagberg</i>	123
B.1	Évolution du nombre de publications (tous domaines confondus) des termes <i>agriculture</i> et <i>supply chain</i> dans le titre, le résumé ou les mots-clés (données tirées du moteur de recherche Scopus, le mois de septembre 2014)	124
B.2	Évolution du nombre de publications (dans les domaines : <i>engineering</i> , <i>computer science</i> , <i>decision sciences</i> et <i>mathematics</i>) des termes <i>agriculture</i> et <i>supply chain</i> dans le titre, le résumé ou les mots-clés (données tirées du moteur de recherche Scopus, le mois de septembre 2014)	124
C.1	Classification taxonomique des céréales livrées à la SCARA	125
D.1	L'intégration des logiciels ARENA ¹ et C++ ²	125

Résumé :

La filière agroalimentaire se confronte aujourd'hui à des exigences toujours plus rigoureuses imposées par la mondialisation des marchés, l'accroissement de la concurrence et la grande distribution. Afin de rester compétitive dans cette conjoncture, la chaîne logistique agricole de l'activité de récolte de céréales doit considérer les aspects environnementaux, garantir une compétition durable et répondre aux normes sur la traçabilité, la qualité, l'hygiène et la sûreté de produits agricoles.

La gestion d'un système d'activités agricoles intègre d'une part, des paramètres *a priori* déterministes, tels que : les ressources humaines, matérielles, ou temporelles, et d'autre part, des facteurs stochastiques, comme : les aléas météorologiques, les ressources financières, les demandes des clients, etc. L'hétérogénéité des facteurs à envisager et leur caractère dynamique rendent la chaîne logistique complexe et difficile à aborder et surtout à l'améliorer dans son intégralité.

Le sujet de thèse se place donc dans ce contexte particulier et vise notamment l'activité de récolte de céréales et oléagineux, la période de moisson étant primordiale en matière de quantité et qualité de production, *i.e.* des revenus pour les agriculteurs et des richesses pour le territoire. Plus spécifiquement, la gestion de l'activité de récolte implique les opérations de collecte, de transport et de stockage des céréales, réalisées sur plusieurs exploitations agricoles dispersées géographiquement. D'une façon générale, les principaux objectifs sont étroitement reliés à tous les niveaux classiques de décision :

- ❑ **niveau stratégique** : organiser et trouver la meilleure configuration de la chaîne logistique pour tous les acteurs impliqués dans son pilotage ;
- ❑ **niveau tactique** : dimensionner les moyens et les mutualiser afin de réduire les coûts liés à l'activité de récolte ;
- ❑ **niveau opérationnel** : piloter les flux de céréales entre les champs et les unités de stockage, en tenant compte des risques liés aux incertitudes météorologiques.

Outre son intérêt pratique, la thèse s'inscrit dans le cadre de la recherche opérationnelle (RO) et plus précisément se réfère à l'optimisation déterministe et stochastique, la simulation de flux à événements discrets, ainsi qu'à leur couplage. Dans ce sens, nous avons développé un système d'aide à la décision capable de répondre au besoin de l'industriel que ce soit au niveau opérationnel, tactique ou stratégique. Ainsi, la synergie créée entre les outils de la RO, système d'information géographique, statistique inférentielle et prédictive nous a permis de rendre le système d'aide à la décision compétitif et performant.

Mots clés : agriculture ; logistique (organisation) ; recherche opérationnelle ; méthodes statistiques ; systèmes d'aide à la décision ; simulation, méthodes de ; programmation stochastique

Abstract :

To overcome the new challenges facing agricultural sector, imposed by globalisation, changing market demands and price instability, the crop production supply chain must particularly be very reactive, flexible, with a high yield and at low cost. Its improving and eventual re-configuration can lead to an upgrade in efficiency, responsiveness, business integration and make it able to confront the market competitiveness. The conjuncture becomes even more complex due to the highly dynamic behaviour and stochastic environment of crop production supply chains that integrates variability in processing time at each operation and uncertainties in reception demand, customer satisfaction, crop quality degradation, etc.

The thesis is thus placed in this particular context and refers to the crop harvesting activity, which is considered a pivotal stage in the cereal production circuit owing to its high cost and impact on the returns earned. Managing the harvest activity involves gathering, transportation and storage operations, performed by a collection of agricultural holdings geographically dispersed. Generally speaking, the main objectives refer to all levels of decision-making process :

- ❑ **strategical level** : evaluate and propose an improved supply chain (re-)design for all targeted actors ;
- ❑ **tactical level** : dimension and pool used resources in order to reduce costs related to harvesting activity ;
- ❑ **operational level** : manage cereal crops from growing fields to long-term storage facilities, by taking into account the risks related to weather repercussions.

and, also, to evaluate the whole supply chain, from growing fields to storage facilities, with a view to improving its performances and to reducing the overall cost.

Besides its practical relevance, this thesis forms part of the Operational Research (OR) and more specifically, refers to the linear and stochastic programmings, discrete event simulation, and their coupling. In addition, the synergy created between OR, inferential and predictive statistics, geographical information system tools makes the decision support system very competitive, efficient and responsive.

Keywords : agriculture ; business logistics ; simulation methods ; operations research ; stochastic programming ; statistical methods ; decision support systems

Introduction générale

“ *La coopérative est un outil construit pour tous au service de chacun...*

Hubert RICHARD, Président de la SCARA en 1972

”

Sommaire

1.1	Présentation de l'entreprise	1
1.1.1	La SCARA	1
1.1.2	Les savoir-faire	2
1.2	Contexte et problématique	3
1.3	Objectifs, démarche et contributions	3
1.4	Structure de la thèse	4

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche regroupant trois partenaires : la coopérative agricole de la région d'Arcis-sur Aube (SCARA), le Laboratoire d'Optimisation des Systèmes Industriels (LOSI) de l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et l'Institut du Végétal Arvalis (ARVALIS). Cette thèse a fait l'objet d'une convention CIFRE et s'est déroulée au sein de la SCARA.

1.1 Présentation de l'entreprise

1.1.1 La SCARA

Depuis 1922, la SCARA (Société Coopérative Agricole de la Région d'Arcis) est une coopérative agricole au service des agriculteurs de la Région d'Arcis sur Aube (cf. Fig. 1.1), qui emploie 65 collaborateurs, en disposant d'un chiffre d'affaires, selon les évolutions des marchés de céréales et d'engrais, entre 55 et 80 millions d'euros. L'activité de la coopérative se fait avec environ 450 agriculteurs adhérents (actionnaires, fournisseurs de collecte, clients d'intrants).

La coopérative repose sur trois axes de développement :

- ☐ *vers le client* : la création de valeur ajoutée, par la différenciation des matières premières agricoles ;
- ☐ *vers l'adhérent* : la croissance, basée sur la modernité et l'adaptabilité des politiques d'approvisionnement/collecte/service ;
- ☐ *vers la performance* : le partenariat, pour acquérir les moyens à mettre en œuvre des stratégies de développement et de la création de valeurs.



FIGURE 1.1 – SCARA : une localisation géographique au cœur de grands axes de commercialisation (Scara, 2011)

Dans les grandes lignes, la coopérative accompagne les agriculteurs du début du cycle de la production jusqu'à son terme, étant véritablement le prolongement de l'exploitation agricole. Conseils, ventes de produits aux agriculteurs pour bonifier leurs production et, en bout de chaîne, le négoce pour valoriser les produits à leurs clients finaux, constituent le labour au quotidien de la SCARA.

1.1.2 Les savoir-faire

L'activité de la SCARA est centrée autour de la collecte, du stockage, de la conservation et de la vente des céréales, des oléagineux et protéagineux, produits par les agriculteurs dans des bassins de collecte situés dans la Champagne Crayeuse (60 000 ha sur une zone homogène).

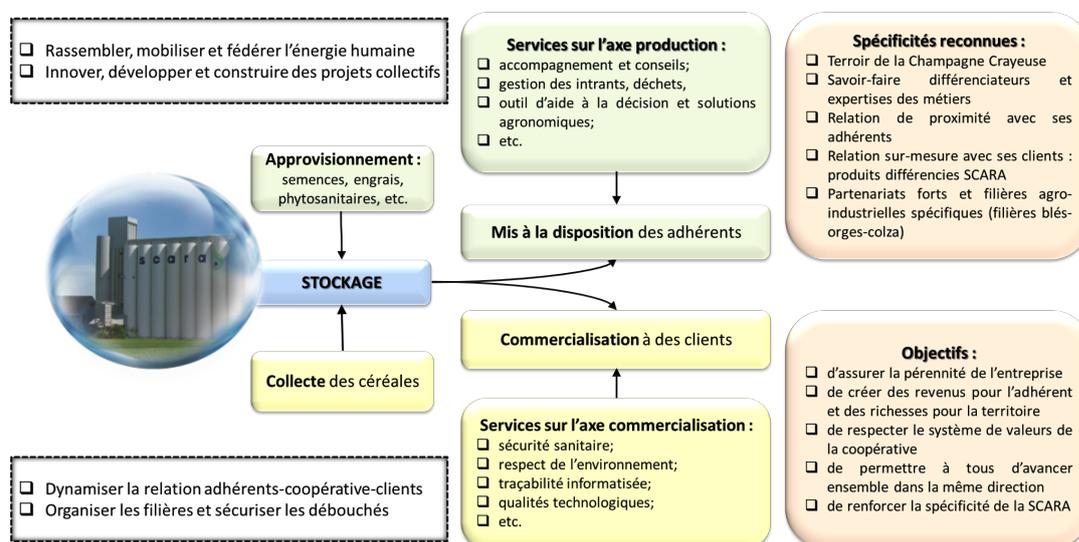


FIGURE 1.2 – Savoir-faire de la SCARA (Scara, 2011)

Les principaux métiers de la SCARA sont liés à la collecte et à la commercialisation de céréales et d'oléoprotéagineux sur des marchés différenciés, mais également aux conseils et aux services pour ce qui concerne les engrais, les semences et les produits de protection des cultures agricoles (cf. Fig. 1.2).

1.2 Contexte et problématique

Dans le cadre de cette thèse, c'est l'activité de collecte qui est visée, la période de moisson étant primordiale en matière de quantité et qualité de production pour répondre aux exigences du marché. La gestion de l'activité de collecte implique les opérations de récolte, transport et stockage des céréales, réalisées par plusieurs exploitations agricoles, dispersées géographiquement.

Dans la conjoncture actuelle du marché des céréales, avec des contraintes de plus en plus fortes, la performance est devenue un enjeu crucial pour le secteur de l'agriculture. Dans cette optique, la SCARA a souhaité repenser sa chaîne logistique, pour ainsi progresser vers une approche plus industrielle - ce qui nécessite de reconfigurer l'organisation de ses flux logistiques, imaginer de nouveaux modes d'échanges et de collaboration avec ses adhérents, dimensionner et mutualiser les moyens mécaniques et humains, etc. Dans le cadre de son projet d'entreprise, la SCARA envisage d'optimiser les systèmes de culture actuels en développant de nouveaux modèles de production, respectueux de l'environnement et générateurs de valeur ajoutée pour ses exploitations, et tout ceci en tenant compte des exigences de ses clients.

1.3 Objectifs, démarche et contributions

L'objectif industriel final est de disposer d'un outil d'aide à la décision, capable de répondre à des problèmes relevant des niveaux de décisions stratégique, tactique et/ou bien opérationnel, c'est-à-dire :

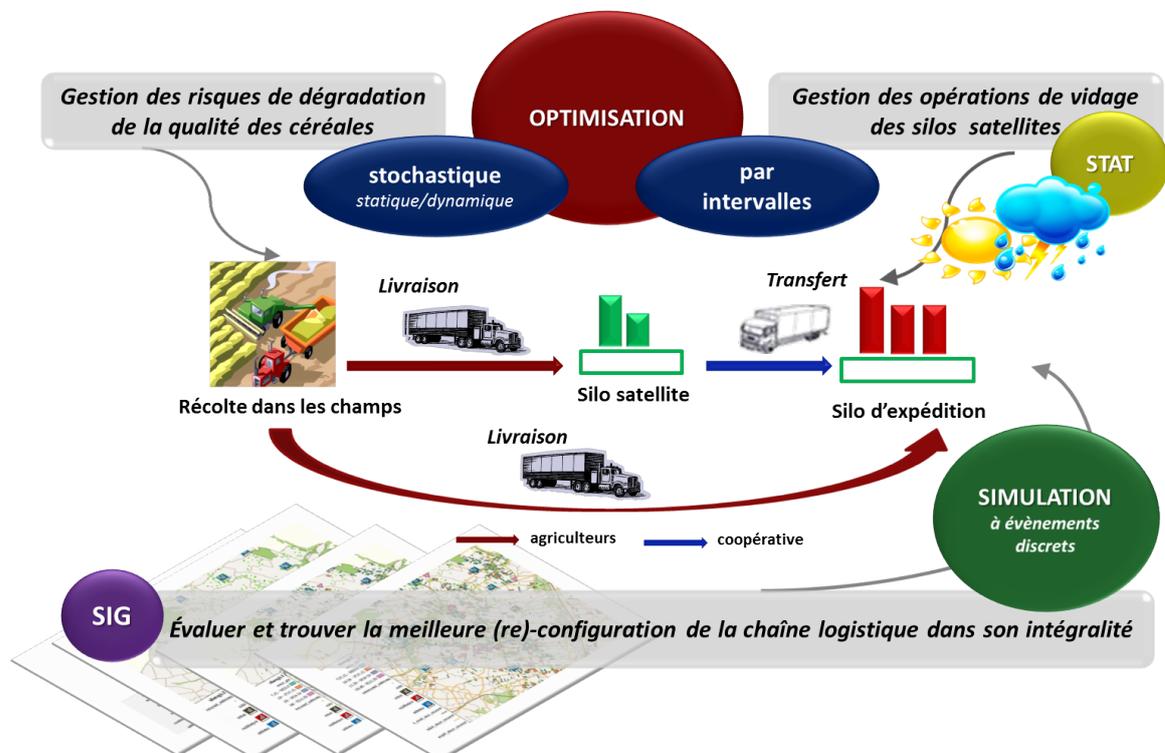


FIGURE 1.3 – Gestion de la chaîne logistique agricole : un aperçu méthodologique du système d'aide à la décision

- ❑ **niveau stratégique** : évaluer et trouver la meilleure (re)-configuration de la chaîne logistique pour tous les acteurs visés ;
- ❑ **niveau tactique** : dimensionner les moyens et les mutualiser afin de réduire les coûts liés à l'activité de récolte ;
- ❑ **niveau opérationnel** : piloter les flux de céréales entre les champs et les organismes de stockage, en tenant compte des risques liés aux incertitudes météorologiques.

Afin d'aborder la complexité et la nature dynamique de la chaîne logistique de la coopérative concernée dans cette étude, nous avons développé un système d'aide à la décision, qui utilise des outils issus de la recherche opérationnelle (RO) et plus précisément se réfère à l'optimisation linéaire, robuste et stochastique ; la simulation de flux à événements discrets ; ainsi qu'à leur couplage. De plus, la synergie créée entre les outils de la RO, le système d'information géographique (SIG) (cf. annexe A), la statistique inférentielle et prédictive rend le système d'aide à la décision compétitif et performant. La Fig. 1.3 illustre graphiquement l'interaction entre les composantes du système d'aide à la décision proposé dans la présente étude.

1.4 Structure de la thèse

Après ce chapitre introductif permettant d'établir le contexte et de définir les principaux challenges de cette thèse, le reste du mémoire est structuré en six chapitres. Afin de parvenir au but désiré, il est important de connaître les avancements et les recherches effectués dans le secteur de l'agriculture pour faciliter la compréhension de l'environnement global. À ce propos, le chapitre suivant fait un tour d'horizon des principales problématiques et des enjeux auxquels est confrontée la chaîne d'approvisionnement agricole dans son sens large, en mettant en exergue les procédés d'aide à la décision, utilisés pour atteindre les finalités et les objectifs visés.

Dans le chapitre 3, nous proposons un modèle de simulation permettant de reproduire et d'évaluer les performances de la chaîne logistique telle qu'elle se présente actuellement au sein de la coopérative agricole visée par cette étude. Il s'agit de faire piloter les flux de céréales des champs jusqu'aux sites de stockage de long terme, en intégrant les activités et les modes actuels d'organisation de tous les acteurs impliqués, sans négliger les réalités du terrain. Une fois la configuration et le fonctionnement de la chaîne logistique sont modélisés et reproduits, nous nous attaquons à travers les quatre chapitres suivants de la thèse aux problématiques de planification de la récolte et de coordination des moyens logistiques.

Ainsi, le chapitre 4 est consacré à la planification de l'activité de récolte permettant aux agriculteurs de mieux confronter les incertitudes météorologiques au bénéfice d'un aboutissement favorable d'une année de production. Compte tenu de la nature des éléments aléatoires qui y interviennent, nous nous intéressons plus spécifiquement à la programmation sous contraintes probabilistes. À cet égard, un modèle stochastique est élaboré et résolu ultérieurement par des reformulations linéaires *ad hoc*, basées sur des approches de réduction de scénarios météorologiques.

À notre connaissance et tel qu'illustré au chapitre 4, la plupart des problèmes modélisés par la programmation stochastique sous contraintes probabilistes sont considérés statiques de par leur nature, *i.e.* les décisions sont prises *hic et nunc* (*here and now* en anglais) et ne changent pas une fois les incertitudes sont révélées au fil du temps. Pour surmonter cette limitation en vue de prendre en compte le dynamisme temporel de l'activité de la récolte des céréales dans un environnement sujet aux incertitudes climatiques,

nous proposons un modèle multi-étapes à horizon glissant dans le chapitre 5. De plus, afin de résoudre ce modèle nous développons également une approche dynamique pro-active, dont l'efficacité est prouvée par plusieurs expérimentations numériques à grande échelle.

Toujours à l'écoute et au service de ses adhérents, la coopérative met un point d'honneur à faciliter leur quotidien, ceci en particulier pendant les quelques semaines de récolte, période d'une importance décisive dans la valorisation d'une année de production. Dans cet esprit, le chapitre 7 s'intéresse à la planification des opérations de vidage des silos de collecte, visant à garantir une capacité de stockage suffisante pour collecter convenablement les livraisons des agriculteurs, sans pour autant perdre de vue les aspects qualitatifs liés au stockage (allotement des céréales, etc.). Au cœur du chapitre 7, un programme d'optimisation robuste par intervalles endosse en effet ces préoccupations, étant précédé d'une étude statistique relative au comportement des agriculteurs en matière de livraison des collectes de céréales pendant la période de récolte au chapitre 6.

Étant complémentaires, les approches de simulation et d'optimisation sont ensuite couplées dans le chapitre 8, pour faire ainsi, expérimentalement et analytiquement, front commun aux défis relevés lors du pilotage de la chaîne logistique agricole dans son intégralité. À la lumière des fonctionnalités procurées par le couplage simulation-optimisation, la configuration actuelle de la chaîne logistique considérée dans le présent mémoire, est également remise en cause dans le chapitre 8. Sous le prisme de plusieurs indicateurs de performance spécialement dressés à cet effet, plusieurs modèles de collaboration, paramétrages et re-configurations possibles sont modélisés et évalués *via* d'études de scénarios alternatifs.

In fine, une conclusion générale sur les travaux effectués au cours de cette thèse, ainsi que les perspectives qui s'y ouvrent, clôturent ce document.

État de l’art : management de la chaîne d’approvisionnement agricole

“ Nous évoluons dans une économie du marché. Nous devons donc être tournés vers les besoins du marché et à l’écoute de nos clients...”

Agnès DUWER, Directeur Général, SCARA

”

Sommaire

2.1 Introduction	7
2.2 Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire	9
2.2.1 Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire des produits non-périssables	12
2.2.2 Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire des produits périssables	15
2.3 Chaîne d’approvisionnement agro-énergétique	19
2.4 Chaîne d’approvisionnement en aliments pour bétail	24
2.5 Chaîne d’approvisionnement en produits industriels	25
2.6 Conclusions et perspectives	26

2.1 Introduction

L’agriculture est un terme générique, employé pour désigner les nombreuses façons dont les plantes sont cultivées, les cultures et les animaux domestiques subviennent aux besoins de la population mondiale en fournissant des denrées alimentaires, des aliments pour bétail, de la bioénergie et des matériaux pour différents produits industriels. Ce secteur couvre un large spectre d’activités telles que la culture des plantes, la domestication, l’horticulture, l’arboriculture et la végéculture. Il porte aussi sur un vaste éventail d’organisations de la gestion du bétail comme la polyculture-élevage, le pastoralisme et la transhumance (Harris and Fuller, 2014). Dans cet ordre d’idées, distinguons les quatre principaux domaines d’utilisation industrielle de la production agricole non-transformée, qui sont d’ailleurs en compétition pour attirer les

agriculteurs : l'alimentation humaine, animale, production de biomasse et de matériaux industriels (cf. Fig. 2.1).

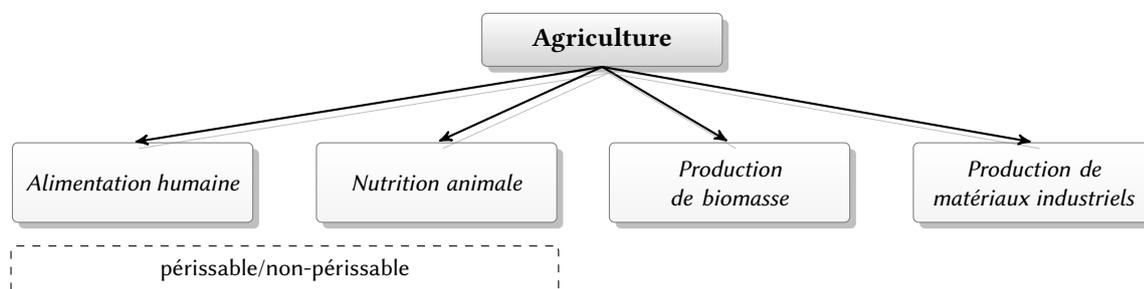


FIGURE 2.1 – Filière agricole : les principaux domaines d'utilisation

Actuellement, la filière agricole subit une double et accrue pression : **(i)** d'une part, elle doit être gérée de manière durable pour pouvoir obéir aux besoins du présent sans compromettre pour autant la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins, et **(ii)** d'autre part, elle doit fournir de la nourriture, de l'énergie et des ressources industrielles pour satisfaire aux exigences de la population mondiale, toujours croissante (El Bassam et al., 1998). Il n'est donc pas surprenant qu'au cours des deux dernières décennies, cette filière suscite un vif intérêt des praticiens et de la communauté scientifique (cf. annexe B).

Plus particulièrement, la chaîne d'approvisionnement agricole vise la planification et la gestion de l'ensemble de processus et d'activités, allant de la préparation du sol et plantation jusqu'à la commercialisation et/ou le traitement des produits récoltés. L'organisation des coordinations entre maillons au sein de la chaîne concerne à la fois le pilotage et le contrôle des flux de matières premières et d'information, les opérations logistiques associées ainsi que les dispositifs mis en place pour établir et réguler les relations entre les acteurs impliqués : fournisseurs, industriels, distributeurs et commerçants (cf. Fig. 2.2). À titre d'exemple, la Fig. 2.3 schématise les principales décisions à prendre par une exploitation agricole aux trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.



FIGURE 2.2 – Chaîne logistique agricole : les principaux acteurs (Hovelaque et al., 2009; Beske et al., 2014)

En amont, l'offre de la matière première agricole est quantitativement et qualitativement confrontée aux conditions météorologiques y incluant les inégalités inter-régionales quant au climat, à la composition des sols, aux politiques agricoles ainsi qu'aux divers facteurs saisonniers (maladies végétales, ravages causés par les organismes nuisibles, etc.). En aval, le marché agricole est un marché particulier, hétérogène, instable et sensible aux aléas (prix, qualité, etc.), caractérisé par une instabilité structurelle, par une financiarisation croissante et par de nouvelles formes de régulation (Roux, 2013). Sur un tel fond, la pluralité de visions de la chaîne d'approvisionnement agricole qui s'y imposent, génère souvent une multitude de problématiques représentant en même temps des champs d'action potentiels.

Étant donné la complexité et la nature des questions et des problèmes à traiter en matière de management agricole, c'est surtout la recherche opérationnelle qui propose des méthodologies et des outils appropriés pour la gestion quantitative des opérations et d'aide dans la prise de décisions (Thornley and France, 2007;

Higgins et al., 2010), en faisant le pont entre la théorie et la mise en pratique industrielle. De surcroît, la simulation semble être une méthodologie efficace, tel que attesté par Woodward et al. (2008) en se penchant sur la modernisation et l'innovation dans l'organisation des systèmes agricoles. Dans cette direction, plusieurs études et recherches ont été effectuées avec l'intention de guider, optimiser et éventuellement (re-)configurer l'organisation et la gestion des chaînes d'approvisionnement agricoles, ainsi que de gérer les aspects inhérents à leurs environnements disparates.

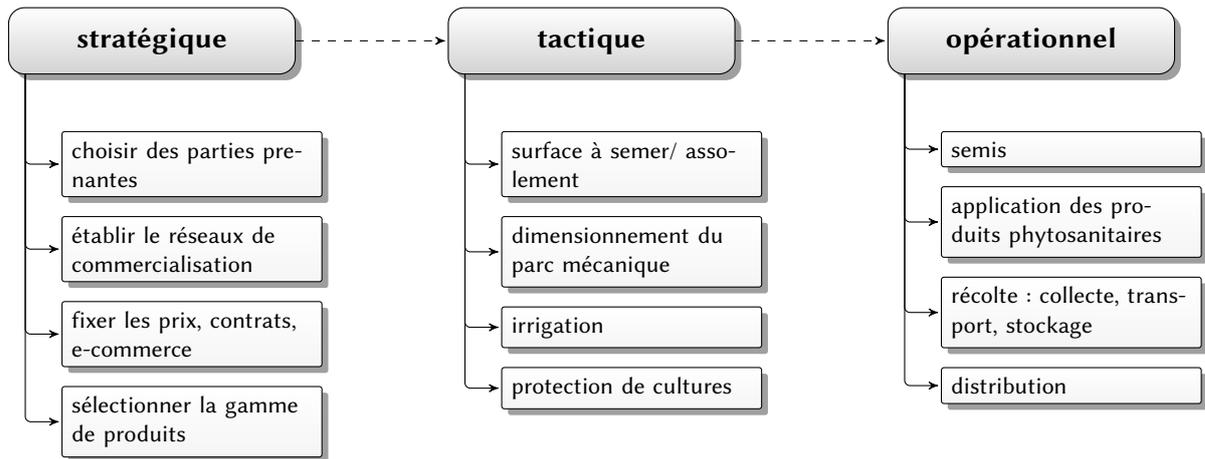


FIGURE 2.3 – Exploitation agricole : les décisions à prendre du stratégique à l'opérationnel (Jang and Klein, 2011)

Ce chapitre se propose donc de dresser une vue d'ensemble de la littérature se référant à la gestion de la chaîne logistique agricole à travers cinq sections. Étant concernés par certaines problématiques du secteur agro-alimentaire, dans la section suivante nous attacherons plus particulièrement notre attention aux études et recherches menées à ce titre. De plus, afin de mettre en relief la forte compétitivité entre les filières agro-alimentaire et agro-énergétique, la section 2.3 s'intéresse à la gestion du potentiel énergétique des biomasses agricoles. Ensuite, dans la section 2.4 nous abordons les travaux se rattachant à la filière bétail, car dans des circonstances de forte dégradation, il est fréquent que la production en matière première dédiée *a priori* à l'alimentation humaine soit finalement déclassée en fourragère. Sans négliger l'approvisionnement en produits industriels, la section 2.5 lui est consacrée. Finalement, dans la section 2.6 nous présentons une conclusion synthétique et pointons les plus importantes lacunes et suggestions qui en découlent pour de futures recherches.

2.2 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire

La production agro-alimentaire représente le plus large segment de l'économie mondiale (Jang and Klein, 2011). La chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire comporte les étapes suivantes : l'amont agricole, la production agricole, la production alimentaire, la distribution au détail, la restauration et la consommation. En fonction de la durée de vie, les produits agro-alimentaires se distinguent en deux classes : *non-périssables*, pour des produits consommables qui peuvent être stockés sur un long terme sans nécessairement présenter de risques pour la santé ou leurs qualités nutritionnelles, et *périssables*, pour des produits agricoles des cycles courts de production et de vie (*cf.* Fig. 2.1).

À présent, il existe une panoplie d'articles d'états de l'art et d'études de synthèse qui apporte un éclairage précieux sur les différentes problématiques et avancements récents dans la filière agro-alimentaire. Un exemple éloquent dans ce sens est l'ouvrage de [Thornley and France \(2007\)](#), consacré aux applications de modèles et méthodes mathématiques dans les domaines végétaux, animaux et écologiques.

D'une façon plus ciblée, plusieurs études bibliographiques complémentaires ont été conduites sur les diverses facettes de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire. L'un des sujets les plus discutés est la planification au sens large du terme. [Ahumada and Villalobos \(2009\)](#) propose un article de synthèse très circonstancié sur l'utilisation des outils de la recherche opérationnelle dans la résolution des problèmes de planification et distribution, visant aussi bien les produits agricoles périssables que ceux non-périssables. Les auteurs ont effectué un recensement des travaux existants dans ce domaine à travers le prisme du niveau de décision du problème traité (stratégique, tactique, opérationnel) et de l'approche d'optimisation utilisée (programmation linéaire, programmation dynamique, programmation stochastique, programmation stochastique dynamique). Plus récemment, [Akkerman et al. \(2010\)](#) révisent les contributions disponibles en matière de gestion quantitative des opérations dans les réseaux de distribution agro-alimentaires, en remettant en cause les questions sur la qualité, la sécurité alimentaire et le développement durable.

Sur le plan des exploitations agricoles, [Glen \(1987\)](#) donne un aperçu des problèmes de planification résolus à l'aide de techniques de la recherche opérationnelle, en mettant en valeur les quatre les plus importants aspects identifiés : la politique et le modèle de culture utilisés, les opérations de récolte, la capacité de production et l'investissement en capital, ainsi que le contrôle des organismes nuisibles et des maladies des plantes. [Schweigman et al. \(1990\)](#) ont discuté les diverses utilisations de la recherche opérationnelle dans la résolution des problèmes de sécurité agro-alimentaire qui se posent aux agriculteurs dans les pays développés.

La logistique et le transport, activités abondamment étudiées dans le cadre de la recherche opérationnelle, sont discutés dans l'article de [Lucas and Chhajed \(2004\)](#) en tant qu'éléments constitutifs d'une importance primordiale le long de la chaîne d'approvisionnement agricole. L'intégration des démarches de développement durable, préoccupation majeure et actuelle dans le secteur agricole, est un autre propos largement révélé et débattu dans la littérature ([El Bassam et al., 1998](#); [Yakovleva et al., 2012](#); [Hall et al., 2012](#)). Tel que le témoigne [Beske et al. \(2014\)](#), un intérêt croissant est manifesté à ce sujet, aussi bien par les praticiens que par les chercheurs. De leur côté, ces derniers auteurs insistent sur la nécessité d'opérer des changements dans le mode actuel de pilotage de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire vers de nouveaux modèles axés sur le développement durable, en argumentant avec de nouvelles opportunités commerciales qui s'y entendent.

En se basant sur les études bibliographiques mentionnées ci-dessus et afin de présenter un état de l'art complémentaire, nous nous focalisons sur les travaux récents se rattachant à la gestion des activités de la filière agro-alimentaire (*cf.* tableaux 2.2 à 2.4). Dans l'ensemble de cette littérature, quatre grands courants thématiques, autour desquels la majorité des auteurs ont centré leurs études, peuvent être distingués :

- planification ([Itoh et al. \(2003\)](#); [Miller et al. \(1997\)](#); [Catalá et al. \(2013\)](#); [Tan and Cömnden \(2012\)](#); [Darby-Dowman et al. \(2000\)](#), etc.), et distribution ([Paksoy et al. \(2012\)](#); [Cholette \(2009\)](#), etc.)
- valorisation économique de la matière première agro-alimentaire ([Vizvári et al. \(2011\)](#), etc.)

- ❑ quête de solutions novatrices, qui prennent actuellement la forme de meilleures pratiques (Catalá et al. (2013); Liu et al. (2014); Zanoni and Zavarella (2012), etc.)
- ❑ tentative de collaboration pour une meilleure gestion des flux physiques (Catalá et al. (2013); Sazvar et al. (2014), etc.).

En grandes lignes, tel que nous pouvons le constater, la volonté d'investir dans de meilleures organisations, stratégies, voire modes de fonctionnement dans la filière persiste au long de ces vingt dernières années et ceci est du aux bouleversements politiques, économiques et environnementaux.

Maintenant que le contexte est établi et les principales problématiques sont soulevées, procédons à la prospection de la littérature connexe à travers le prisme d'approches utilisées pour la résolution des problèmes rencontrés dans ce domaine. En conformité avec la nature des données et paramètres considérés en entrées, deux grandes classes de problèmes se distinguent, à savoir les problèmes *déterministes*, et respectivement les problèmes *non-déterministes*. Les problèmes déterministes comportent uniquement des données *a priori* définissables et sont amplement étudiés au sein de la recherche opérationnelle. Comme le montre le nombre assez large d'études menées dans un univers déterministe (cf. tableaux 2.2 et 2.1), la programmation linéaire, mixte en nombres entiers et dynamique s'avèrent être des outils incontournables et viables pour la prise de décisions dans un contexte complexe, tel que c'est le cas dans la filière agro-alimentaire.

Dans un concours versatile de circonstances climatiques, économiques et environnementales, la chaîne d'approvisionnement est fortement soumise aux différentes sources d'incertitudes, qui ont une incidence considérable, notamment sur la rentabilité des systèmes agro-alimentaires. Ainsi, l'intégration des éléments d'incertitudes et d'indétermination dans les démarches méthodologiques est d'une importance capitale dans la configuration et la conception des systèmes agro-alimentaires flexibles et réactifs. À ce titre et en relation avec la façon dont les connaissances relatives au contexte de notre étude sont quantifiées et entraînées dans le processus de décision, deux procédés sont utilisés pour répondre convenablement aux objectifs visés : approche *analytique* et la *simulation*.

Dans le cadre d'une approche analytique, un système ou un modèle est formalisé mathématiquement de façon déterministe et/ou non-déterministe. Étant des outils relativement peu conjugués avec le secteur de l'agriculture mais assez prometteurs (cf. tableaux 2.3 et 2.4), nous continuons d'affiner la classification des modèles non-déterministes selon la manière dont les incertitudes sont modélisées et prises en compte dans un problème de décision :

- ❑ *probabiliste* : les incertitudes sont décrites par des lois de probabilité ;
- ❑ *de façon déterministe* : les incertitudes sont approximées *via* des domaines paramétriques où elles peuvent varier, *i.e.* par intervalles de valeurs plausibles, ensembles convexes, etc. ;
- ❑ *possibilistique* : les coefficients incertains sont définis par éléments/ensembles flous.

Ainsi, lorsque les incertitudes sont définies par des lois de probabilité, il s'agit de la programmation stochastique, paradigme incluant des modèles probabilistes : **(i)** sans recours (SP) ou avec recours (TSP), et de même **(ii)** sous contraintes probabilistes jointes (JCCP) ou bien séparables (SCCP). Au contraire, lorsqu'aucune information sur les probabilités n'est disponible, c'est dans le cadre de la programmation robuste que ce cas peut être envisagé. Nous avons considéré ici la programmation robuste dans toute son étendue, *i.e.* couvrant les approches qui modélisent les incertitudes : **(i)** de façon déterministe, dans le cadre de la programmation linéaire par intervalles (IvP), et **(ii)** possibilistique, se référant à l'optimisation floue (FP) ou

à la programmation floue par but (FGP). En revanche, à l'instar de certains auteurs nous ne confondons pas la robustesse, intégrant les incertitudes dans le processus de décision, avec l'analyse de sensibilité, étudiant *a posteriori* l'incidence de la variabilité des données d'entrée sur une solution calculée.

Il convient de noter que les tableaux 2.2 et 2.1 regroupent uniquement les références les plus récentes, postérieure à l'excellente revue proposée par [Ahumada and Villalobos \(2009\)](#), celles-ci étant délibérément sélectionnées dans un souci de compléter cette dernière référence. En revanche, quant aux modèles non-déterministes, nous nous proposons de les réexaminer d'une façon plus subtile, compte tenu de la vulnérabilité des systèmes agricoles face aux aléas.

En tant que systèmes complexes, les problématiques visant la chaîne d'approvisionnement agricole sont souvent difficiles voire impossible à être décrites et abordées analytiquement. Dans ces situations, le recours à la simulation permet d'appréhender leurs structures ou fonctionnements.

2.2.1 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits non-périssables

La chaîne d'approvisionnement des produits agricoles non-périssables (céréales, oléagineux, protéagineux, thé, pommes de terre, noix, etc.) est caractérisée par une production de matières premières saisonnière, des schémas de consommation réguliers et des sources d'approvisionnement aussi bien locales qu'éloignées. En croisant les tableaux 2.1, 2.3 et 2.4, quatre domaines d'interventions se révèlent particulièrement abordés dans le cadre de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits non-périssables, à savoir :

- ❑ *qualité technologique et sécurité alimentaire* : la vocation de la filière agro-alimentaire ne se limite pas à la seule production de matières premières destinées à la consommation humaine ; elle doit également produire des aliments privilégiant la santé et en conformité avec les réglementations environnementales imposées. Sous cet angle, l'orientation des agriculteurs vers de nouveaux itinéraires de production compatibles avec le respect de l'environnement et répondant aux attentes des consommateurs, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Préserver raisonnablement le rendement de la récolte et garantir sa qualité sanitaire ([Junqueira and Morabito, 2012](#)) ; optimiser l'application des produits phytosanitaires et/ou phytopharmaceutiques en apportant le produit agricole le plus efficace, à la bonne dose et au bon moment ([Boussemart et al., 2013](#); [Cardoso et al., 2009](#)) ; équilibrer la fertilisation azotée pour prévenir la pollution des eaux souterraines et des sols ([Peña Haro et al., 2011](#); [Moussouni and Aidene, 2012](#)), ne sont que quelques exemples.
- ❑ *irrigation* : plusieurs travaux ont été dédiés à gérer la mobilisation et la distribution des ressources en eau, depuis une source d'approvisionnement jusqu'aux parcelles des agriculteurs, ainsi qu'à répartir dans le temps un volume d'eau plus ou moins limité, en fonction de différents facteurs, tels que : besoins en eau, calendriers culturaux, techniques d'irrigation utilisées par les agricultures ([Lu et al., 2011](#); [Gupta et al., 2000](#); [Li et al., 2014](#); [Shi et al., 2014](#); [Belhouchette et al., 2012](#); [Amini Fasakhodi et al., 2010](#); [Azamathulla, 2012](#)).
- ❑ *planification de la production et de l'activité de la récolte* : du champ où les produits céréaliers sont récoltés jusqu'à leur livraison aux structures de stockages ou directement à l'acheteur, ils subissent séquentiellement les activités de récolte dans les champs ([Ali et al., 2009](#)), transport ([Ali et al., 2009](#)) et de stockage. Aussi bien séparément qu'en concertation étroite avec tous les acteurs impliqués, une série de travaux a été conduite dans le but de guider convenablement ces activités au profit

des préoccupations de rentabilité financière sans pour autant négliger l'aspect relatif à la qualité de production (Zheng et al., 2013; Janová, 2012; Vizvári et al., 2011; Bharati and Singh, 2014; Houshyar et al., 2012; Molaei, 2011; Thakur et al., 2010; Moussouni and Aidene, 2012).

- *commercialisation et distribution* : entre les produits agricoles qui sortent de champs et ceux retrouvés chez le consommateur, une diversité d'acteurs (agriculteurs, coopérative de collecte, expéditeurs, grossistes, distributeurs professionnels) cherche, autant que peut se faire, à valoriser économiquement la matière première dans le cadre de différents types de circuits commerciaux. En tant qu'activités qui soulèvent maints problèmes de minimisation des risques financiers et de maximisation de profit, la distribution et le négoce agricole, notamment des produits céréaliers, a rencontré un grand écho auprès des chercheurs et praticiens (Asgari et al., 2013; Burer et al., 2008; Paksoy et al., 2012).

Abordons maintenant les contributions analytiques regroupées dans les tableaux 2.1, 2.3 et 2.4 sous l'angle de méthodes et approches utilisées pour la résolution des problèmes étudiés. Les méthodes déterministes continuent à attirer une grande attention dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement agricole des produits non-périssables. Malgré la forte variabilité et les incidences considérables d'incertitudes sur le bon déroulement de la chaîne agricole non-périssable, la popularité des modèles déterministes peut s'expliquer par la simplicité de leur utilisation combinée à l'efficacité des solutions proposées d'une part, et par les avancées théoriques disponibles au sein de la recherche opérationnelle, d'autre part (Ahumada et al., 2012).

Compte tenu de la présence de diverses sources d'incertitudes dans la filière agricole, les méthodes de la programmation stochastique et robuste sont aussi bien utilisées en tant que moyens analytiques capables de guider la prise de décision dans un univers incertain. Le recours à la modélisation probabiliste et, par là, à la programmation stochastique, est souvent préféré lorsqu'il s'agit d'incertitudes météorologiques ou celles liées au rendement de récolte.

Quand aucune information probabiliste n'est disponible, les incertitudes peuvent être caractérisées par des éléments/ensembles flous ou par des intervalles, afin de pouvoir les prendre en considération dans le cadre de programmes robustes. Ces types de modélisation permettent de couvrir un plus large éventail des incertitudes, telles que : financières (demande vs. profit/investissement/coût), liées à l'activité de récolte (rendement, débit, disponibilités des ressources en eau), etc.

Largement utilisée pour accompagner le pilotage des chaînes d'approvisionnement agricoles, la simulation est également fréquemment rencontrée comme outil dans la gestion de l'activité de la récolte des produits non-périssables (Sorensen and Gilheany, 1970; Semenzato et al., 1995; Arjona et al., 2001). Les opérations principalement visées sont les suivantes : assolement (Castellazzi et al., 2010), collecte dans les champs (Guan et al., 2008; De Toro and Hansson, 2004), irrigation (Tong and Guo, 2013) et/ou transport, et tout cela face à une large panoplie d'incertitudes : conditions météorologiques, fiabilité des ressources agricoles (panne des équipements agricoles, temps de réparations, débit de moissonneuse batteuse, etc.), logistique (temps de chargement/déchargement, file d'attente, etc.).

Notons également la volonté manifestée par les praticiens de bénéficier de logiciels ou supports informatisés d'aide à la décision. Dans ce sens, intégrant les outils de gestion quantitative des opérations et des méthodes de la recherche opérationnelle, il convient de mentionner le logiciel proposé par Confalonieri et al. (2013) consacré à la gestion des activités dans les champs, qui considère les différentes pratiques de culture de blé, les aspects météorologiques et pédologiques. Zñidarsik et al. (2008) développent un outil

Tableau 2.1 – Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire non-périssable : liste des modèles mathématiques déterministes

référence	principales objectifs de la publication
Ali et al. (2009)	résoudre un problème logistique lié aux opérations de récolte des céréales dans les champs, ayant pour objectif : (i) de coordonner l’interaction entre les moissonneuse-batteuses et les tracteurs, et (ii) de réduire également le temps d’inactivité des moissonneuse-batteuses dans les champs
Amini Fasakhodi et al. (2010)	aborder le problème de gestion des ressources en eau et la planification de distribution de différentes types de cultures (céréalières et oléagineuses en grande partie) sur une surface donnée (<i>cropping pattern</i> , en anglais) à une échelle régionale
Asgari et al. (2013)	déterminer les quantités optimales de blé à transporter des régions productrices aux régions consommatrices, par mois sur une année
Azamathulla (2012)	planifier l’irrigation de différentes variétés céréalières au niveau d’une exploitation agricole
Boussemart et al. (2013)	analyser la propagation des pratiques d’utilisation de pesticides dans la production des cultures céréalières (blé, orge, colza) et évaluer leurs éventuelles réductions
Cardoso et al. (2009)	proposer des solutions multi-objectifs pour le problème de prévention contre les organismes nuisibles, considérant à la fois le coût de l’application de l’action de prévention et le coût des dommages économiques
Junqueira and Morabito (2012)	présenter un modèle d’optimisation multi-critères pour un problème de fertilisation des cultures oléagineuses en tenant compte du rendement et de la qualité de la récolte, ainsi que de la consommation d’énergie et des effets environnementaux
Molaei (2011)	analyser les bénéfices de la production agricole de différents types des cultures céréalières et légumineuses dans une région spécifique
Moussouni and Aidene (2012)	gérer le problème d’application des engrais chimiques pour une production céréalière convenable, tout en se préoccupant de la pollution de l’environnement
Qi et al. (2010)	étudier le problème du développement et de la production du maïs, en s’intéressant à son rendement et à son utilisation ultérieure (alimentaire, énergétique ou fourragère)
Thakur et al. (2010)	fournir une méthode efficace pour minimiser l’effort de traçabilité en minimisant les risques liés à la sécurité alimentaire causés par l’agrégation de différents lots dans les éleveurs à grain
Zheng et al. (2013)	étayer la prise de décisions dans l’organisation de la récolte du maïs, incluant les activités de production, stockage et transport

d'aide à la décision répondant aux questions écologiques et économiques rencontrées dans les systèmes de cultures agricoles (céréalières, oléagineuses, etc.).

2.2.2 Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits périssables

Les chaînes logistiques agro-alimentaires des produits frais sont plus complexes, à cause d'incertitudes supplémentaires liées au marketing, à la durée de vie plus courte et à l'instabilité de la matière première, ainsi qu'à des politiques de la récolte et des circuits de commercialisation spécifiques. Compte tenu de la portée de plus en plus grande de nouveaux enjeux, l'attention de la communauté scientifique et des praticiens est centrée autour de six grandes thématiques (cf. tableaux 2.2, 2.3 et 2.4) :

- ❑ *qualité technologique* : en dépit de l'importance primordiale de la qualité et fraîcheur des produits périssables, les aspects qualitatifs et de sécurité alimentaire sont moins mis en avant dans la littérature jusqu'à présent, en tant que thèmes centraux le long de la chaîne d'approvisionnement (Rong et al., 2011). Les préoccupations en matière de qualité et de dégradation sont traitées sous forme de fonctions-objectifs ou contraintes dans le cadre de la planification de l'activité de récolte ou des opérations de stockage (Pahl and Voß, 2014).
- ❑ *planification de l'activité de récolte* : tant pour les produits non-périssables que pour ceux périssables, l'activité de récolte est une étape cruciale et décisive dans le circuit de production, fait qui explique la vaste étendue des travaux spécialement menés pour une bonne organisation et planification (Jena and Poggi, 2013; Dos Santos et al., 2011; Caixeta-Filho, 2006; Jena and Poggi, 2013; Bohle et al., 2010; Itoh et al., 2003; Miller et al., 1997; Munhoz and Morabito, 2014; Costa et al., 2014; Darby-Dowman et al., 2000; Tan and Cömden, 2012).
- ❑ *gestion de stocks* : représente une tâche incontournable lorsque les produits périssables sont en question. D'une part, le sur-stock peut avoir un impact commercial considérable, car il est sujet à pénaliser directement la réactivité commerciale du rayon vis-à-vis des opportunités d'approvisionnement et compromettre ainsi la compétitivité économique dans son environnement concurrentiel. D'autre part, un niveau de stock tampon non-maîtrisé donne lieu à des ruptures dommageables pour le revenu. Suivre la tendance du marché sur des prix d'achat élevés, notamment dans certaines saisons de ventes irrégulières ; maintenir un niveau faible des stocks de produits pour garantir la fraîcheur ; gérer les stocks en tenant compte de la saisonnalité de certains produits, ne sont que quelques problématiques soulevées dans la littérature spécialisée (Piramuthu and Zhou, 2013; Lodree Jr. and Uzochukwu, 2008).
- ❑ *livraison et distribution* : les produits périssables, peu compatibles avec la notion de stockage, forcent les industriels à rationaliser, accélérer et synchroniser les rythmes et les flux de leurs cycles de distribution, production et achat, en prenant en considération : les tendance et rythmes de vente, le calendrier de production, les caractéristiques des produits (durée de vie, signes de qualité, origine, etc.), gestion du transport sans rupture de la chaîne du froid, etc. (Ahumada and Villalobos, 2011; Govindan et al., 2014; Agustina et al., 2014; Ahumada et al., 2012; Sazvar et al., 2014).
- ❑ *commercialisation et rentabilité financière* : un fort intérêt peut être remarqué pour l'établissement des modèles d'organisation et de coordination de la chaîne d'approvisionnement des produits agro-alimentaires périssables, cherchant essentiellement à : améliorer la disponibilité en rayon ; s'adapter au *marché du climat* (*weather market* en anglais, terme désignant les marchés pour lesquels l'aspect météorologique joue un rôle décisif) ; répondre à des objectifs de rentabilité financière et établir

Tableau 2.2 – Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire périssable : liste des modèles mathématiques déterministes

référence	principales objectifs de la publication
Agustina et al. (2014)	étudier les opérations de cross-docking pour assurer la livraison des produits alimentaires frais en juste à temps et au moindre coûts
Alcaide-López-de Pablo et al. (2014)	appliquer la programmation linéaire multi-critère pour un problème soulevé dans l'industrie de l'huile d'olive
Ahumada and Villalobos (2011)	élaborer un modèle intégré de planification tactique pour résoudre une problématique de production et de distribution des produits agricoles périssables
Catalá et al. (2013)	présenter un modèle de planification stratégique pour une restructuration efficace d'une exploitation agricole d'arbres fruitiers (pommiers et poiriers) en fonction de variétés et de densité de plantation
De Avila Pacheco and Morabito (2011)	aborder un problème de gestion de trésorerie rencontré dans une entreprise brésilienne agroalimentaire typique qui produit du jus d'orange concentré
Dos Santos et al. (2011)	développer un modèle binaire pour un problème de planification de rotation des cultures légumières
Caixeta-Filho (2006)	proposer un modèle linéaire pour la gestion de la récolte d'orange sous une gamme de contraintes chimiques, biologiques et logistiques se référant à la qualité des oranges
Jena and Poggi (2013)	développer un modèle mixte en nombres entiers pour le problème de planification de la récolte de canne à sucre destinée à la production ultérieure de sucre et d'alcool
Liu et al. (2014)	déterminer une stratégie dynamique conjointe d'investissement et de tarification des produits alimentaires périssables en tenant compte de la demande dépendante du rapport qualité-prix, tout en maximisant le profit
Piramuthu and Zhou (2013)	développer un modèle de gestion de stocks des produits périssables en considérant que la demande dépend directement du volume et de la fraîcheur des produits
Govindan et al. (2014)	proposer un modèle d'optimisation multi-objectif pour une chaîne logistique à deux échelons de distribution des produits alimentaires périssables, en intégrant le développement durable dans la prise de décision
Hu et al. (2014)	analyser l'intégration et la compétitivité d'une chaîne d'approvisionnement d'une usine de production sur les marchés de légumes
Nagasawa et al. (2009)	construire un modèle de gestion d'une chaîne d'approvisionnement des produits agricoles frais en considérant de production périodique
Rong et al. (2011)	intégrer les préoccupations sur la qualité dans la prise de décision tout au long de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire de produits périssables
Zamoni and Zavarella (2012)	déterminer la meilleure configuration de la chaîne logistique agro-alimentaire de produits périssable, en analysant l'incidence de la température et de la durée de stockage sur la qualité des produits, les coûts, la durabilité de la chaîne et la consommation d'énergie

Tableau 2.3 – Chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire : liste des modèles mathématiques stochastiques

référence	approche	source d'aléas	principales objectives de la publication
Ahumada et al. (2012)	TSP	rendement de récolte, prix	présenter un modèle de planification tactique pour la production et la distribution des produits agricoles frais
Cholette (2009)	TSP	demande	évaluer la répartition de la production des vignobles à travers de multiples canaux de vente
Costa et al. (2014)	TSP	demande	étudier le problème de rotation des cultures légumières, en tenant compte de la demande et des contraintes écologiques
Darby-Dowman et al. (2000)	TSP	rendement de récolte	établir des plans optimaux de plantation pour les cultures légumières
Lodree Jr. and Uzochukwu (2008)	SP	demande	aborder le problème de gestion des stocks de produits frais avec délais d'approvisionnement non-négligeables qui persistent après un nombre de périodes connu
Sazvar et al. (2014)	TSP	demande	traiter un problème de transport soulevé dans le cadre d'une chaîne d'approvisionnement centralisée des produits périssables et proposer une nouvelle politique de réapprovisionnement
Tan and Cömden (2012)	SP	date de maturité, durée et rendement de récolte	présenter une méthodologie de planification pour une entreprise dont l'objectif est de faire correspondre l'offre annuelle aléatoire de fruits et légumes provenant d'un nombre d'exploitations agricoles sous contrat, avec la demande aléatoire des détaillants au cours de la période de planification
Belhouchette et al. (2012)	RSP	météo	évaluer la durabilité des systèmes d'irrigation des cultures céréalières et fourragères
Burer et al. (2008)	SP	demande	examiner les pratiques contractuelles entre les fournisseurs et les détaillants dans l'industrie céréalière
Janová (2012)	SP	rendement de récolte, profit	élaborer des procédures de validation et de vérification pour les modèles d'optimisation de la planification des cultures céréalières, oléagineuses et pommes de terre
Maatman et al. (2002)	TSP	météo	décrire au niveau des agriculteurs les stratégies de production, stockage, vente, achat et consommation des céréales depuis le début de la saison des semis jusqu'à un an après la récolte
Peña Haro et al. (2011)	JCCP	conductivité hydraulique	présenter une méthodologie d'optimisation stochastique pour le problème de contrôle de la pollution des eaux souterraines par des nitrates d'origine agricole céréalière
Vizvári et al. (2011)	SCCP	rendement de récolte	analyser l'efficacité de l'utilisation des terres arables en cultures céréalières, oléagineux et pommes de terre

Tableau 2.4 – Chaîne d’approvisionnement agro-alimentaire : liste des modèles mathématiques robustes

	référence	approche	source d’aléas	principales objectives de la publication	
PÉRISSABLE	Bohle et al. (2010)	FP	productivité de la main-d’œuvre	aider à la prise de décisions dans la gestion des activités liées à la récolte de raisins	
	Itoh et al. (2003)	FP	profit	proposer un modèle de planification de récolte des cultures légumières pour guider les exploitations agricoles à prendre de décisions	
	Hasani et al. (2012)	IvP	demande, d’achat	coûts	introduire un modèle général et complet pour la conception stratégique en boucle fermée d’une chaîne d’approvisionnement des produits agricoles périssables
	Miller et al. (1997)	FP	début et rendement de récolte, coût de pénurie	déterminer le calendrier de production pour une station d’emballage de tomates	
	Munhoz and Morabito (2014)	FP	acidité du jus d’orange	résoudre le problème de planification de production du jus d’orange concentré congelé	
	Bharati and Singh (2014)	FP	profit	présenter un modèle de planification de production céréalière au niveau des exploitations agricoles	
	Gupta et al. (2000)	FP	profit, investissement, surface irriguée, etc.	résoudre le problème de gestion de l’irrigation en eau en élaborant des plans de production céréalière et oléagineuse appropriés	
	Sharma and Jana (2009)	FP	rendement de récolte, coût	aider à la gestion d’application de produits nutritifs pour un problème de planification de production des cultures de riz	
	Shi et al. (2014)	IvP	profit, montant des subventions agricoles, demande en eau, surface de récolte, etc.	résoudre un problème régional d’allocation des ressources en eau pour les cultures de riz, patate douce, soie, thé, colza, etc.	
	Houshyar et al. (2012)	FP	consommation de carburants, engrais, produits chimiques, etc.	évaluer la consommation d’énergie dans la production de maïs	
NON-PÉRISSABLE	Li et al. (2014)	FP	disponibilité des ressources en eau	aborder le problème d’allocation des ressources en eau dans le cadre d’un système agricole se référant à la production céréalière	
	Lu et al. (2011)	IvP	disponibilité de l’eau, perte de l’eau	résoudre un problème de gestion des ressources en eau, en générant des stratégies de répartition de l’eau pour les cultures de blé, pomme de terre et luzerne	
	Magsood et al. (2005)	IvP	profit, perte et débit de l’eau	résoudre un problème de planification d’un système d’irrigation agricole pour les cultures de blé, pomme de terre et luzerne	
	Paksoy et al. (2012)	FP	demande	un problème de production et distribution rencontré dans une entreprise productrice de matières premières oléagineuses et d’huiles alimentaires	

des indicateurs économiques appropriés comme : le retour sur investissement ou le rendement des capitaux propres (De Avila Pacheco and Morabito, 2011; Liu et al., 2014; Alcaide-López-de Pablo et al., 2014; Cholette, 2009).

- *conception et pilotage de la chaîne d'approvisionnement dans son intégralité* : compte tenu de la durée de vie limitée, la détermination d'une politique de (ré)-approvisionnement de ces produits est beaucoup plus délicate, en particulier dans un environnement durable. À ce propos, un grand nombre d'auteurs se sont investis à la conception performante de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits périssables allée aux considérations économiques, sociales et environnementales (Catalá et al., 2013; Zaroni and Zavanella, 2012; Nagasawa et al., 2009; Hu et al., 2014; Hasani et al., 2012).

Passons maintenant en revue les différents moyens de résolution des difficultés rencontrées dans le management de la chaîne d'approvisionnement agro-alimentaire des produits périssables sus-mentionnés. Du point de vue analytique, c'est de même la modélisation et l'optimisation déterministes qui sont en grande majorité articulées pour formaliser et résoudre notamment les problèmes de planification (stratégique, tactique, opérationnel), gestion de stocks, investissement, etc. (cf. tableau 2.2).

Les auteurs ayant pris en compte la dimension probabiliste des problèmes, font recours à la programmation stochastique (cf. tableau 2.3). Il s'agit souvent des incertitudes relatives à la demande, coût ou rendement de récolte, et plus rarement date de maturité/début de récolte.

Dans de nombreuses applications, la programmation stochastique n'est pas applicable en raison de l'insuffisance d'information probabiliste. Tel que l'atteste le tableau 2.4, il est néanmoins possible de parvenir aux buts visés face aux aléas ou indéterminations, notamment celles liées à la demande, coût ou profit, en appliquant les approches robustes proposées par la recherche opérationnelle.

Parmi les travaux les plus récents consacrés à la gestion de la chaîne d'approvisionnement des produits agro-alimentaires périssables *via* l'utilisation la simulation ou en combinant expérimentalement différentes techniques d'aide à la décision, citons Van der Vorst et al. (2009) qui proposent un outil basé sur la simulation à événements discrets, intégrant les préoccupations sur la qualité, l'innocuité et la durabilité des produits agro-alimentaires périssables. Teimoury et al. (2013) ont examiné la chaîne d'approvisionnement de fruits et de légumes à travers un modèle de simulation permettant de conduire plusieurs analyses multi-critères de scénarios, et d'évaluer leur performance. Par rapport aux chaînes d'approvisionnement agro-alimentaires non-périssables, la simulation est moins appliquée dans la maîtrise des chaînes d'approvisionnement agro-alimentaires périssables, malgré son utilité évidente dans la filière.

2.3 Chaîne d'approvisionnement agro-énergétique

Au cours de ces dernières années, dans le contexte de tension mondiale sur les sources d'énergie d'origine fossile non renouvelable, présentant d'ailleurs des risques de raréfaction, le potentiel énergétique des biomasses agricoles anime un intérêt de plus en plus prononcé (Yue et al., 2014). Tel que le montre la série d'études menées à ce sujet (cf. tableaux 2.5, 2.6 et 2.7), parmi les ressources en biomasse utilisées à des fins non-alimentaires, la part de la matière première provenant du secteur de l'agriculture (céréales; oléagineux; résidus : paille, bagasse; plantations à vocation énergétique : saules, miscanthus, etc.) est en forte progression. Distinguons donc les principales familles de problèmes soulevées par la

Tableau 2.5 – Chaîne d’approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques déterministes

référence	principales objectifs de la publication
Aldana et al. (2014)	maximiser le potentiel de production de biocarburants à partir de la biomasse résiduelle d’origine agricole
Bai et al. (2011)	aborder le problème d’emplacement des bio-raffineries, en minimisant le coût total du système de production incluant : les investissements des raffineries, le coût de la matière première, les coûts liés au transport publique et aux ressources de transport
Cucek et al. (2014)	traiter un problème de gestion multi-périodique d’un réseau intégrant les approvisionnements en biomasse et en bioénergie
Cobuloglu and Büyüktaktakn (2014)	trouver la configuration optimale des cultures de plantes semées sur différentes types des sols en vue de maximiser le revenu total de la production de biomasse avec respect de l’environnement optimiser économiquement les systèmes de production et de distribution dans de villages bio-énergétiques
Uhlémair et al. (2014)	modéliser la production de cultures de biomasse pour l’approvisionnement des bio-raffineries et évaluer le coût de livraison
Griffith et al. (2014)	analyser et aborder les problèmes logistiques liés à l’activité d’approvisionnement en biomasse d’une bio-raffinerie
Shastri et al. (2011)	proposer un modèle d’optimisation conjoint de la production en biomasse et d’approvisionnement en matières premières bio-énergétiques
Ekşioğlu et al. (2009)	trouver l’itinéraire optimale de traitement d’éthanol, du butanol, de l’acide succinique et des mélanges de ces produits chimiques avec des combustibles fossiles à base d’essence
Zondervan et al. (2011)	concevoir des topologies de réseaux de production de carburant biodiesel synthétique de deuxième génération <i>via</i> un modèle multi-périodique mixte en nombres entiers
Walther et al. (2012)	évaluer le rendement économique d’une nouvelle espèce de pâturage vivace pour les systèmes agricoles des terres arides
Doole (2012)	gérer la commercialisation du porc
Ohlmann and Jones (2011)	trouver les compromis autour de l’utilisation de la biomasse pour l’alimentation du bétail <i>versus</i> la couverture des sols dans les exploitations laitières
Zondervan et al. (2011)	résoudre un problème de planification de l’activité des moissonneuses-batteuses pendant la période de récolte de fourrages
Carpente et al. (2010)	fournir un outil d’aide à la décision capable de traiter les problèmes de gestion de la qualité de l’eau et d’évaluer différentes politiques et stratégies de gestion dans le cadre d’un système agricole d’élevage
Zhang et al. (2011)	
aliments en bétail	
agro-énergétique	

Tableau 2.6 – Chaîne d'approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques stochastiques

référence	approche	source d'aléas	principales objectifs de la publication
Azadeh et al. (2014)	SP	demande, coût	résoudre un problème de planification multi-périodique multi-produits de la production et de la distribution de biocarburants dans le cadre d'une chaîne logistique, en maximisant le profit espéré
Osmani and Zhang (2013)	TSP	demande, coût, offre, rendement	maximiser le profit d'une chaîne d'approvisionnement de bioéthanol d'origine lignocellulosique
Chen and Fan (2012)	TSP	demande, offre	résoudre un problème de planification stratégique des systèmes de chaîne d'approvisionnement de bioéthanol et d'allocation optimale des ressources de matière première (résidus agricoles, fo-restières, etc.) dans un environnement incertain
Kostin et al. (2012)	TSP	demande	concevoir et planifier des infrastructures pour la production de bioéthanol et du sucre
You (2013)	TSP	demande, offre	imaginer la chaîne d'approvisionnement optimale pour des bio-raffineries
Flaten and Lien (2007)	SP/TSP	profit	modéliser les fermes laitières biologiques, en incluant l'aversion au risque dans la fonction-objectif sans négliger d'autres types de risques y pouvant intervenir
Guan and Philpott (2011)	MSP	approvisionnement en lait	résoudre un problème de planification de la production laitière, en tenant compte de contrats, de la demande et de la quantité d'approvisionnement incertaine en lait
Heikkinen and Pietola (2009)	SP	coût	calculer l'investissement optimal et étudier le dynamisme du coût incertain du revenu agricole dans le cadre d'un problème de planification soulevé dans l'industrie laitière
Moghaddam and DePuy (2011)	SCCP	rendement de récolte	déterminer le nombre optimal d'acres de foin à récolter, acheter ou vendre, pour satisfaire les besoins en alimentation des chevaux, tout en maximisant le profit total de la ferme
Nielsen et al. (2011)	SDP	rendement laitier	gérer la constitution des troupeaux laitiers et évaluer la production laitière des vaches
Peña et al. (2009)	SCCP	éléments nutritifs dans les ingrédients alimentaires	améliorer le processus de composition de l'alimentation du bétail, en confrontant le coût de la ration avec les probabilités de répondre aux besoins nutritionnels des animaux

Tableau 2.7 – Chaîne d’approvisionnement agricole non-alimentaire : liste des modèles mathématiques robustes

référence	approche	source d’aléas	principales objectifs de la publication
Xie et al. (2010)	IvP/SP	demande, coût, source énergétique	gérer les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes énergétiques
Tan et al. (2012)	FP	quantité de biomasse importée	optimiser la production et la commercialisation de biomasse d’origine agricole en respectant les contraintes environnementales
Kasivisvanathan et al. (2012)	FP	performance nominique, impact environnemental	supplanter une moulin de presse d’huile de palmier en bio-raffinerie intégrée
agro-énergétique			
Doole (2012)	FP	production de <i>bituminaria</i>	évaluer le bénéfice des différentes variétés d’espèces de pâturage pour les systèmes agricoles des terres arides
Darvishi Salookolayi et al. (2011)	FP	montant de la satisfaction alimentaire	déterminer les rations alimentaires convenables pour les vaches laitières
Gebrezgabher et al. (2014)	FGP	émissions de GES et NH	évaluer les compromis entre l’incidence socio-économique et environnemental dans le cadre de la gestion du fumier
Cadenas et al. (2004)	FP	quantité de la nourriture et des nutriments	déterminer les régimes alimentaires conformes pour le bétail
Zhang et al. (2009)	FP	coût de l’exploitation agricole, prix de récolte, frais de manutention du fumier, revenu du bétail, etc.; <i>éléments flous</i> : perte de sol, pertes maximales admissibles en l’azote et du phosphore en phase solide, etc.	étudier les systèmes de décision conçus pour gérer les activités agricoles (re-cadrage des zones de récolte, gestion de fumier et application des engrais, dimensionnement du bétail d’élevage) et évaluer les répercussions des restrictions en quantité et qualité de l’eau pour atteindre les objectifs du développement régional économique
aliments en bétail			
Zhang et al. (2011)	IvP/FP	<i>intervalles</i> : coût de l’exploitation agricole, prix de récolte, frais de manutention du fumier, revenu du bétail, etc.; <i>éléments flous</i> : perte de sol, pertes maximales admissibles en l’azote et du phosphore en phase solide	fournir un outil d’aide à la gestion de la qualité de l’eau et à l’élaboration des politiques et stratégies efficaces

communauté scientifique conjointement avec les praticiens, concernant la chaîne d'approvisionnement agro-énergétique :

- ❑ *sécurité énergétique et changements climatiques* : étant promue comme l'une des alternatives pour améliorer la disponibilité de la sécurité énergétique et de l'énergie, ainsi que pour atténuer le réchauffement climatique, la bioénergie a suscité l'attention des chercheurs dans cette optique, en faveur de l'agriculture et de la sécurité alimentaire. Plus particulièrement, la combustion des biomasses représente une conversion efficace de leur énergie, dégageant une quantité négligeable de gaz à effet de serre (Xie et al., 2010).
- ❑ *transport et logistique* : la plus grande fraction du coût de la production d'énergie issue de biomasse provient des opérations logistiques (Shastri et al., 2011). Certes, organiser la gestion de problèmes logistiques permet d'augmenter la compétitivité économique, mais aussi de progresser vers des systèmes de transport plus écologiques en adéquation avec les exigences de la société et favorables au respect de l'environnement.
- ❑ *planification de production, approvisionnement et distribution* : la plupart des travaux scientifiques s'articulent autour de problèmes de planification de production de biomasse, approvisionnement des usines de traitement de biomasse et la distribution en aval vers les consommateurs (Azadeh et al., 2014; Walther et al., 2012; Zondervan et al., 2011; Shastri et al., 2011; Griffith et al., 2014; Aldana et al., 2014; Bai et al., 2011; Uhlemair et al., 2014).
- ❑ *rentabilité économique et commercialisation* : tandis que le réchauffement climatique pose de nouvelles menaces pour le secteur de l'agriculture, expliqué notamment par l'augmentation des gaz à effet de serre (Xie et al., 2010), la production et l'utilisation de biomasse, quant à elles, soulèvent de nouveaux challenges du côté marché. Quelques-uns ont été étudiés dans les travaux de Tan et al. (2012); Osmani and Zhang (2013).
- ❑ *conception de la chaîne d'approvisionnement agro-énergétique* : à l'heure actuelle, la chaîne d'approvisionnement agro-énergétique est en pleine construction, soulevant divers problèmes : implantation géographique des usines de transformation de la biomasse en agro-carburants, considération des aspects de rentabilité financière (fluctuation des prix de la biomasse, la variabilité de la demande en carburant, etc.); viabilité économique des raffineries, etc. (Kasivisvanathan et al., 2012; Chen and Fan, 2012; Kostin et al., 2012; You, 2013; Cobuloglu and Büyüktaktakn, 2014; Bai et al., 2011).

Nous avons voulu insister sur les paradigmes et les méthodes analytiques utilisés dans la résolution des problèmes évoqués ci-dessous, pour cela nous avons classé les travaux effectués dans ce sens en trois tableaux. Ainsi, le tableau 2.5 passe en revue la liste de problèmes résolus par l'intermédiaire des approches de la programmation déterministe (linéaire, mixte en nombres entiers, etc.). En grandes lignes, il s'agit des problèmes de planification de production, logistiques, et d'implantation de sites bio-énergétiques.

Le tableau 2.6 présente les études qui prennent en compte des données stochastiques disponibles sous forme probabiliste. Fait aisément constatable, ce sont la demande et les prix du marché d'une part, et les quantités d'approvisionnement d'autre part, les sources prépondérantes d'incertitudes dans le secteur agro-énergétique. À défaut de toute connaissance probabiliste, confrontant les mêmes sources d'aléas, mais déjà sous forme d'intervalles ou éléments flous, les méthodes robustes sont moins appliquées dans le cadre de la chaîne d'approvisionnement agro-énergétique (cf. tableau 2.5).

La production de biocarburants à partir de produits agricoles a augmenté rapidement ces dernières années, et devrait continuer à s'intensifier à l'avenir. En tant qu'une alternative renouvelable en pleine expan-

sion à la ressource fossile, la production de biomasse, et respectivement la chaîne d’approvisionnement agro-énergétique sont en cours de conception et de développement. Par conséquent, les outils analytiques d’aide à décision et la simulation sont assez largement sollicités dans leur création, configuration et évaluation. Par exemple, [Sukumara et al. \(2013\)](#) évaluent *via* un modèle de simulation, plusieurs technologies de conversion de bio-raffinerie ainsi que de la performance de la chaîne d’approvisionnement, englobant divers types d’incertitudes, tels que : les variations saisonnières de la disponibilité de la biomasse, les fluctuations du prix du diesel, l’absence de pré-traitement, l’augmentation des coûts du travail, la diminution de la disponibilité de la main-d’œuvre, etc. Pour vérifier l’impact de la dimension climatique sur les stratégies des agriculteurs liées à l’autonomie fourragère, [Lurette et al. \(2013\)](#) développent un simulateur pour explorer la répercussion de plusieurs scénarios de production de biomasse sur le prix d’achat de fourrage.

Comme nous avons déjà observé, l’un de défis de l’industrie émergente des biocarburants est le niveau élevé d’incertitude dans les quantités d’approvisionnement, la demande du marché, les prix du marché et les technologies de traitement. Face à ces incertitudes, une analyse de sensibilité globale d’une chaîne d’approvisionnement agro-énergétique a été effectuée par [Kim et al. \(2011\)](#), en utilisant la simulation Monte Carlo basée sur un hypercube formé à partir des plages des données aléatoires.

2.4 Chaîne d’approvisionnement en aliments pour bétail

Au sein de l’économie agricole, le secteur de l’élevage de bétail représente un des segments qui connaît la croissance la plus rapide, incité par la hausse des revenus et des évolutions technologiques et structurelles. Par ailleurs, l’utilisation croissante des produits agricoles (notamment de céréales et d’oléagineuses) pour la fabrication de produits de remplacement des combustibles fossiles (l’éthanol et le biodiésel) constitue un défi important pour le secteur de la production animale, forcé à rivaliser pour l’accès aux mêmes matières premières ([Fao, 2009](#); [Qi et al., 2010](#)). En ce qui concerne l’étude de la chaîne d’approvisionnement en aliments pour le bétail, quatre grandes thématiques peuvent être discernées dans la littérature (*cf.* tableaux 2.5, 2.6 et 2.5) :

- ❑ *planification de production des aliments pour bétail* : à mesure que la production du bétail s’intensifie, le passage vers des co-produits et des concentrés agro-industriels de qualité élevée au détriment des pâturages de qualité médiocre (résidus de culture et pâturages naturels), renforcent la nécessité d’une production d’aliments agricoles pour bétail avec un rendement concurrentiel et d’une qualité conforme ([Carpente et al., 2010](#); [Doole, 2012](#)).
- ❑ *constitution de rations* : le problème de rationnement du bétail a trouvé un large écho auprès de chercheurs, capables de proposer des solutions d’alimentation *sur mesure* sous forme de rations équilibrées comblant les besoins quotidiens du bétail, en prenant néanmoins soin de ne pas les excéder ([Nielsen et al., 2011](#); [Doole, 2012](#); [Zhang et al., 2011](#); [Darvishi SalooKolayi et al., 2011](#); [Cadenas et al., 2004](#); [Ohlmann and Jones, 2011](#)).
- ❑ *gestion de fumier* : dans un système biologique, le fumier du bétail peut représenter une ressource importante dans l’amélioration de la fertilité du sol nécessitant une maîtrise correcte pour ne pas devenir des déchets ([Gebrezgabher et al., 2014](#); [Zondervan et al., 2011](#)).
- ❑ *chaîne d’approvisionnement en aliments pour bétail* : en tant qu’un problème complexe, la gestion conjointe de la production fourragère et du bétail est traitée également par la communauté scienti-

fique et les praticiens (Zhang et al., 2009; Pasty, 2004), qui proposent des procédés destinés à faciliter le développement et l'implémentation de bonnes pratiques.

Peu de travaux basés sur la programmation déterministe peuvent être retrouvés dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement en aliments pour bétail (cf. tableau 2.5). La situation est donc inversée pour le domaine de la gestion des opérations dans les champs par rapport aux chaînes agro-alimentaires, où de nombreuses études utilisant des approches déterministes ont été publiées (cf. section 2.2). La programmation stochastique est utilisée pour confronter des modèles d'optimisation tenant compte de différentes sources d'incertitudes : économiques (coût, profit), de production (rendement de récolte, rendement laitier), etc. (cf. tableau 2.6). En revanche, un nombre plus important de modèles robustes ont été conçus pour contribuer à la gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement en aliments pour bétail, permettant la prise en considération des aléas sans pour autant exiger une description probabiliste de ceux-ci (cf. tableau 2.7).

Hormis les méthodes analytiques, mentionnons le travail de Fischer et al. (2009), qui montre que l'intercalation explicite des risques et des incertitudes (e.g. la météo, le changement climatique, la situation du marché ou d'autres risques, tels que la pollution des sols ou des pâturages) dans la planification de la production agricole peut considérablement contribuer dans l'élaboration des stratégies robustes favorables au développement agricole durable. En ce sens, les auteurs proposent un modèle de simulation visant la planification de la production du bétail en expansion, ainsi qu'une nouvelle approche d'optimisation stochastique pour gérer l'allocation de la production dans le cadre de plusieurs scénarios de simulation.

2.5 Chaîne d'approvisionnement en produits industriels

Les cultures *non-vivrières* (*non-food*, en anglais) sont des cultures de plantes destinées à d'autres fins que l'alimentation humaine ou animale, étant depuis longtemps pratiquées dans le cadre de l'agriculture communautaire. Le spectre de ces cultures non-alimentaires est vaste, dont les principaux domaines d'utilisation sont : bioénergie, bâtiment et construction (blé, lin, bambou, etc.), pharmacie (*cannabis sativa*, *echinacea*, armoise, tabac), bio-polymères (blé, maïs, pomme de terre, etc.), produits chimique (huile de colza, huile de lin, chanvre, lavande, etc.), fibres textiles (lin, coton, chanvre, etc.), etc.

Ayant consacré la section 2.3 à la chaîne d'approvisionnement agro-énergétique, nous ne nous intéressons pas ici aux questions relatives à cette dernière. En revanche, interrogeons nous à celles soulevées dans le cadre de la chaîne d'approvisionnement de produits agricoles non-alimentaires, qui constituent les matières premières :

- en fourniture directe pour la transformation vers les industries non-alimentaires (Haneveld and Stegeman, 2005; Golenko-Ginzburg et al., 1996; Leung et al., 2007; McKinion et al., 2001).
- en fourniture directe vers les industries non-alimentaires (Rajaram and Corbett, 2002).

En faisant recours à la programmation linéaire, Haneveld and Stegeman (2005) abordent les exigences liées à la succession de cultures de coton, sorgho et légumes en jachère sur une même parcelle, en maximisant le revenu par hectare. En se basant sur un modèle d'optimisation déterministe non-linéaire, Rajaram and Corbett (2002) décrivent un processus itératif pour la re-configuration d'un processus de production d'amidon à base du blé et du maïs.

Cherchant à maîtriser convenablement la récolte de coton, [Golenko-Ginzburg et al. \(1996\)](#) proposent un système d'aide à la décision multi-niveaux, sujet aux maintes contraintes liées à la gestion de ressources à rendement aléatoire. Pour prendre des décisions en présence d'incertitudes, ces auteurs ont fait appel à la programmation stochastique.

En se rapportant à la demande considérée comme aléatoire, [Leung et al. \(2007\)](#) présentent un modèle robuste et stochastique pour résoudre un problème de planification multi-site de production de coton et de soie, qui vise à minimiser un coût total, incluant des coûts incertains de production proprement-dits, de mains-d'œuvre et de stockage. [McKinion et al. \(2001\)](#), quant à eux, s'intéressent à l'implémentation de solutions d'agriculture de précision dans la production de coton *via* des techniques de simulation et d'analyse de performance.

À notre connaissance, très peu d'études scientifiques ont été dédiées aux nombreuses problématiques se référant au domaine de l'agriculture pour les industries non-alimentaires. Citons-en quelques-unes parmi les plus évidentes : la concurrence des industries papetières, chimiques, lipo-chimiques pour la production de cellulose à partir de plantes à fibres annuelles (sorgho, chanvre, etc.) ; le lancement de nouvelles filières agro-industrielles ; la production éco-compatible répondant aux attentes de la société étant à la fois économiquement viable ; etc. ([Pasty, 2004](#)). Vu la multitude de problèmes susceptibles d'être traités par les outils analytiques et/ou expérimentaux d'aide à la décision, le petit nombre d'études disponibles à ce sujet est réellement surprenant.

2.6 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre nous avons montré l'étendue du spectre des recherches effectuées dans le secteur de l'agriculture, en l'abordant du point de vue d'utilisation finale des produits agricoles à savoir : l'alimentation humaine, animale, production de biomasse et de matériaux industriels. Avec cet état de l'art nous nous sommes proposé transversalement de donner une image globale du degré de mise en œuvre de la recherche opérationnelle et des outils d'aide à la décision dans la résolution de différents types de problèmes rencontrés dans la gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement agricole, tout en mettant en relief les différents paradigmes et approches utilisés pour étayer la prise de décision face à plusieurs sources d'incertitudes.

Tel que le démontrent certains auteurs, agir dans cet univers interdépendant, au croisement des intérêts des fournisseurs, industriels, distributeurs et commerçants représente un levier d'amélioration potentielle et conjointe des performances de ces quatre composantes. Ainsi, l'échange des informations entre les parties concernées, la collaboration au sein des flux physiques, la logistique de retour, la gestion de la fluctuation de la demande et l'efficacité des infrastructures constituent les principaux domaines d'innovation qui contribuent à un pilotage agile et efficient des matières premières agricoles ([Klerkx and Leeuwis, 2008](#); [Soregaroli et al., 2011](#)).

En résumé, tous concernés, les acteurs impliqués dans le pilotage de la chaîne logistique agricoles doivent à la fois :

- ❑ être compétitifs, en utilisant des procédés maîtrisés et économiquement viables ;
- ❑ s'inscrire dans une logique de développement durable en appliquant de pratiques culturelles raisonnées ;

- produire des matières premières agricoles de qualité technologique et sanitaire conformes aux réglementations prescrites dans ce sens et aux attentes des différents utilisateurs et/ou des consommateurs finaux.

Fort de tout ce qui précède, nous avons l'ambition de participer à cette restructuration de la chaîne logistique agricole, en essayant d'améliorer quantitativement et qualitativement la production de la matière première d'une coopérative agricole typique. En conjuguant les outils de la recherche opérationnelle, la simulation à événements discrets, ainsi que les techniques de statistique inférentielle et de prévision, nous nous proposons de développer, dans ce qui suit, un système d'aide à la décision, capable de piloter convenablement la chaîne logistique agricole.

Simulation de la chaîne logistique agricole

“ Nous avons hérité d’une structure performante et de valeurs transmissibles de génération en génération. Il est de notre devoir de préserver et les léguer à nos enfants afin qu’ils puissent construire l’avenir de la coopérative et poursuivre le chemin...”

Jean-Pierre FLOGNY, Président, SCARA

”

Sommaire

3.1 Introduction	29
3.2 Description de la chaîne logistique agricole	30
3.3 Modélisation de la chaîne logistique agricole	32
3.3.1 Composante physique	32
3.3.2 Composante de commande	34
3.3.3 Instanciation et paramétrage	38
3.4 Résultats numériques	41
3.5 Conclusions et perspectives	43

3.1 Introduction

La structure du marché de la filière agro-alimentaire et respectivement de ses chaînes d’approvisionnement ne sont pas statiques. Au contraire, ces dernières sont actuellement l’objet d’une transformation radicale et continue. L’évolution de l’agriculture mondiale et les défis auxquels elle se confronte (cf. chapitre 2), exigent une intensification des efforts en matière de (re-)conception du système agricole. Les démarches dans ce sens doivent reposer sur une analyse et fédération pluridisciplinaires des relations entre ses composantes (biophysique, technique, environnemental, etc.) et envisager une modélisation qui permettra l’évaluation au préalable de l’incidence des innovations techniques et organisationnelles dans la configuration de la chaîne d’approvisionnement agricole dans son intégralité (Le Gal et al., 2010).

Largement utilisée en recherche opérationnelle, la simulation se présente en tant qu'une technique efficace, d'un maniement aisé, pour l'appréhension de comportement des systèmes dynamiques complexes, et dont l'incertitude (endogène ou exogène) des paramètres d'exécution rend très difficile, voire impossible, l'utilisation des méthodes analytiques (Fleury et al., 2006). En mesure d'assimiler le système avec le degré de détail et de granularité qui convient à la résolution du problème posé, elle est utilisée dans de nombreuses applications logistiques, médicales, de production industrielle, etc. ; le secteur de l'agriculture ne faisant pas exception (*cf.* chapitre 2).

À la lumière de ces considérations et à la recherche d'une meilleure configuration de la chaîne logistique agricole, nous nous sommes investis en premier temps dans la conception d'une application de simulation permettant d'intégrer les paramètres survenant d'une manière dynamique afin d'évaluer l'incidence sur la chaîne. Représentant à la fois le cadre de mise en œuvre industrielle, la simulation permet d'organiser la coordination entre acteurs au sein de la chaîne logistique dans une ambiance et des circonstances réalistes.

La suite de ce chapitre se scinde ensuite en quatre sections. Tout d'abord dans la section suivante, nous décrivons la configuration actuelle de la chaîne agricole de la coopérative concernée par cette étude. Dans la section 3.3 nous procédons à sa modélisation proprement-dite, en définissant méticuleusement les deux composantes de la chaîne, *physique* (en sous-section 3.3.1) et *de commande* (en sous-section 3.3.2). Hormis le modèle conceptuel, la simulation se fait à travers la spécification des conditions expérimentales et des paramètres propres à une expérimentation, *i.e.* d'une *instance* et *paramétrage*, structures de données élucidées dans la section 3.3.3. L'implémentation du modèle conceptuel sous ARENA, logiciel largement utilisé dans le monde industriel, ainsi que les expérimentations numériques effectuées sont discutées dans la section 3.4. En dernier ressort, la section 3.5 conclut ce chapitre et énonce les problèmes soulevés, dont la résolution n'est pas possible par voie expérimentale. Par ailleurs, ces derniers feront l'objet des chapitres à venir.

3.2 Description de la chaîne logistique agricole

Étant une étape primordiale et déterminative dans le circuit des céréales, c'est l'activité de récolte qui est concernée par cette thèse (*cf.* Fig. 3.1). Lorsque les céréales ont atteint leur maturité physiologique, les agriculteurs procèdent à la moisson, préalablement concertés sur l'organisation des chantiers mécaniques communs de récolte pour des raisons de rentabilité économiques.

Afin d'être conservées d'une manière appropriée, les céréales sont acheminées vers des implantations physiques de stockage spécialement conçues à cet effet (appelés *silos*), où elles sont soigneusement stockées. Dans ce sens, la coopérative dispose de deux types de silos, équipés du même appareillage de mesure, contrôlé et standardisé, dans le cadre de l'assurance qualité et réception homogène entre tous les silos de stockage :

- **silos d'expédition** : servent au stockage temporaire (à l'abri de l'eau et des polluants) ou au stockage à long terme (aptés à garantir la qualité intrinsèque des grains) ;
- **silos de collecte** (*satellite* ou *habituel*) : servent de stockage de proximité au moment de la moisson des céréales, ayant des capacités réduites par rapport à la quantité totale de récolte. Les quantités

stockées sont ensuite expédiées vers des silos d'expédition dédiés au stockage à long terme, ayant des capacités plus grandes.

Les services de stockage sont mis à la disposition pour deux types d'agriculteurs : *adhérents* et *clients*. Les adhérents sont des agriculteurs engagés par des contrats de production, proposés par la coopérative en vue d'orienter la mise en culture vers des marchés demandeurs et identifiés. Ils s'obligent à produire une variété spécifique selon un cahier de charges défini par le contrat et à livrer à la coopérative ci-concernée. En revanche, les clients sont des agriculteurs individuels qui peuvent également bénéficier de service de stockage, mais qui ne partagent pas avec la coopérative les informations liées à la quantité et à la variété à livrer. Ces derniers peuvent se présenter à la coopérative après récolte pour demander ce service.

Hormis le degré de maturité des céréales, le déroulement de la collecte des céréales est conditionné directement par des circonstances météorologiques. D'une part, la météo influence la longueur de la saison de récolte, aucune collecte ne se faisant le jour, voire plusieurs jours après des pluies abondantes. D'autre part, les pluies affectent souvent d'une façon irréversible la qualité technologique et le rendement des collectes (pourriture/germination/égrenage des grains, casse d'épis, etc.). La collecte de céréales doit donc être achevée dans les plus brefs délais pour éviter les risques de dégradation après la maturité physiologique des grains afin de garantir une qualité optimale (qui se mesure par la teneur en protéines, le poids spécifique, l'indice de chute de Hagberg, etc.), et assurer un rendement de récolte correct.

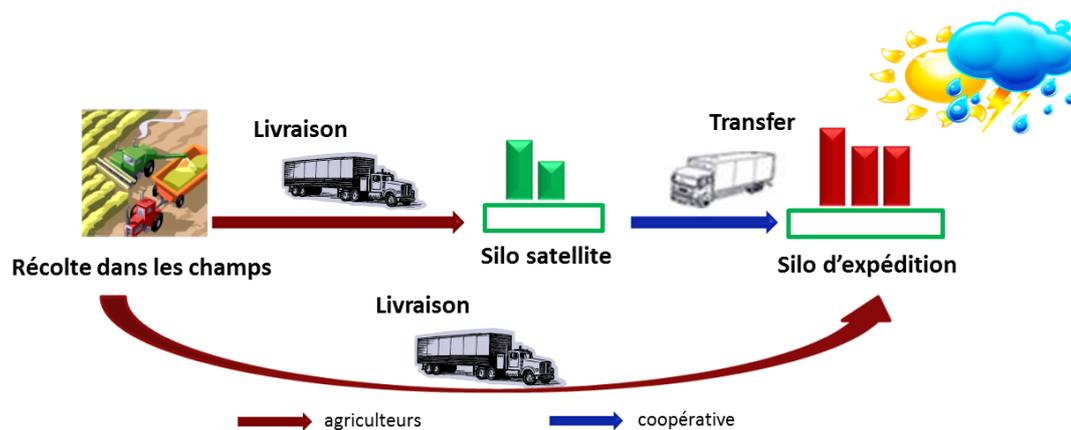


FIGURE 3.1 – Chaîne logistique agricole dans son état actuel

Afin de mieux appréhender un tel système agricole, nous nous proposons à ce stade de l'étude, de développer un modèle logique de simulation événementielle, capable de reproduire fidèlement son fonctionnement intrinsèquement dynamique, en intégrant les activités liées à la phase de collecte de céréales, avec comme but :

- d'organiser la logistique et conduire les flux de céréales entre les champs et les silos d'expédition ;
- de réceptionner et stocker les céréales dans les silos de stockage, en considérant les opérations de vidage des silos de collecte ;
- de prendre en compte les conditions météorologiques.

D'une façon plus générale, un tel modèle de simulation devra nous permettre de reproduire le pilotage de la chaîne logistique agricole actuelle dans son intégralité (des champs aux silos d'expédition), pour

ainsi faciliter la détection d'éventuelles pistes d'amélioration de ses performances et de réduire son coût global. De surcroît, la simulation et l'étude d'autres politiques de stockage (transfert direct champs-silos d'expédition, stockage en bout de champ, etc.) seront également possibles en tant que re-configurations de l'état actuel de la chaîne logistique.

3.3 Modélisation de la chaîne logistique agricole

Le pilotage des flux de céréales pendant la période de récolte est une fonction de temps et de la météo, dont les variations génèrent des changements d'états du système agricole. Il s'agit donc d'un modèle stochastique à événements discrets (discontinus) (Law and Kelton, 2000). La simulation de ce dernier permet ainsi à décrire minutieusement l'ensemble des événements se produisant dans un système de processus ou d'activités lors de leurs déroulements ou fonctionnements durant un horizon de temps.

La construction d'une simulation présuppose la définition de deux structures de données (Altiok and Melamed, 2007) :

- le *modèle conceptuel* proprement-dit : description des composantes statistiques/physiques et dynamiques/logiques du système ;
- l'*instance* et le *paramétrage* : spécification des jeux de données et paramètres propres à une expérimentation.

Ainsi, la sous-section suivante présente en détails les composantes physiques du système agricole étudié dans cette thèse, tandis que la sous-section 3.3.2 aborde minutieusement ses composantes de commande. Ensuite, dans la sous-section 3.3.3, l'instanciation et le paramétrage du modèle sont discutés, avant de procéder à l'expérimentation de la simulation à événements discrets de la chaîne logistique agricole.

3.3.1 Composante physique

Les collectes de céréales sont effectuées par un ensemble de chantiers agricoles sur plusieurs parcelles dispersées géographiquement. À cette phase, la coopérative étant véritablement le prolongement de l'exploitation agricole, propose des services de stockage à travers un ensemble de silos de stockage (*cf.* annexe A). Décrivons donc les deux composantes physiques intervenant lors de l'activité de récolte, y compris les ressources inhérentes à sa conduite.

Chantiers agricoles

Pour des raisons de rentabilité économique, certains agriculteurs préfèrent mutualiser leurs ressources mécaniques ou humaines pendant la récolte de céréales. Un chantier agricole est constitué ainsi d'un ensemble d'agriculteurs (qui peut être de cardinal 1, pour les agriculteurs travaillant tout seul), possédant chacun plusieurs parcelles. Ceux-ci exécutent principalement les opérations de collecte dans les champs et effectuent également la livraison aux silos de stockage. Pour les chantiers avec débit de récolte élevé, des stockages à court terme peuvent être également envisagés. Soit I l'ensemble des chantiers agricoles, possédant chacun P_i parcelles ($i = \overline{1, I}$). Par souci de clarté, énumérons donc les attributs physiques définissant un chantier agricole i , ($i = \overline{1, I}$) :

- ensemble d'agriculteurs, dont chacun est exploitant d'un nombre de parcelles ;
- parc matériel destiné à :
 - *la récolte* : moissonneuses-batteuses (caractérisées par un débit par culture et par heure) ;
 - *le transport* : bennes (caractérisées par une capacité limitée) ;
- stockage :
 - *dédié* (cellule/case) : pour une durée de stockage supérieure à un mois ;
 - *temporaire* : pour une période de stockage qui peut durer quelques jours (caractérisé par une capacité) ;
 - *tampon* : dans le cas où le stockage ne dépasse pas un jour (caractérisé par une capacité).

Il convient de mentionner qu'une *parcelle* p ($p = \overline{1, P_i}, i = \overline{1, I}$) représente une portion de terrain plus ou moins grande, située dans une même commune (canton ou lieu-dit), comportant une même nature de culture-variété et appartenant à un même propriétaire (agriculteur), dont les caractéristiques sont données ci-dessous :

- coordonnées géographiques ;
- surface ;
- type de sol ;
- agriculteur ;
- culture-variété (ajustable selon l'année) ;
- date de maturité physiologique (ajustable selon l'année) ;
- indices de dégradation de la qualité de céréales (ajustable selon l'année, la variété, etc.) ;

Réseaux des organismes stockeurs

Soit S l'ensemble des silos de stockages (de collecte ou d'expédition). Chaque unité de stockage s ($s = \overline{1, S}$), que ce soit un silo d'expédition ou de collecte, se caractérise par les éléments suivants :

- coordonnées géographiques ;
- cellules et paramètres spécifiques pour les opérations de vidage ;
- nombre de fosses (caractérisées par un débit par fosse et par cellule) ;
- séchoirs (caractérisés par un débit) ;
- horaire d'ouverture (ajustable selon l'année) ;
- ressources humaines (effectif).

Tous les silos de stockage proposent des prestations de stockage similaires, sauf le cas de certaines variétés sous contrats spécifiques de production dont les livraisons sont acceptées uniquement dans de silos bien précisés. En ce qui concerne les critères de qualités, une réception homogène entre tous les silos est garantie par leur équipement du même appareillage de mesure (contrôlé et standardisé).

3.3.2 Composante de commande

Le modèle de simulation à événements discrets opère avec des éléments physiques isolables constituant les flux discrets, qui se déplacent individuellement à travers le modèle suivant les événements survenant dans le système. Le fonctionnement d'un tel modèle, la transformation des flux, et le prélèvement de la connaissance évolutive se font *via* des composantes de commande, *i.e.* logiques et/ou dynamiques (Law and Kelton, 2000).

Dans ce qui suit dans cette sous-section, exposons les événements susceptibles de survenir dans le système agricole objet de notre étude, conformément aux opérations auxquelles ceux-ci se réfèrent à savoir : collecte et livraison ; stockage ; file d'attente pour livraison ; vidage de silos de collecte ; séchage (pour les produits oléagineux et maïs).

Collecte et livraison

La génération des flux de céréales et leurs acheminements vers les silos de stockage sont déclenchés par les circonstances suivantes (*cf.* Fig. 3.2) :

- les grains de la parcelle p_i ont atteint la date de leur maturité physiologique ;
- la météo est de bon augure pour les opérations de récolte dans les champs ;
- au moins un silo de stockage est ouvert pour réceptionner les collectes de céréales ;
- le chantier i est disponible pour procéder à la récolte de la parcelle p_i .

Stockage

Une fois les flux de céréales sont arrivés (bennes des agriculteurs) au poste de réception d'un silo de stockage, ils sont soumis aux opérations suivantes (*cf.* Fig. 3.2) :

- prélèvement d'échantillons des grains apportés ;
- affectation d'une fosse, et sa préparation dans le cas échéant ;
- affectation à une cellule compatible. Il est à noter qu'une cellule est considérée *compatible* avec une variété donnée v , si celle-ci est soit spécialement dédiée à la variété v , soit contient des autres variétés autorisées à être mélangées avec la variété v .

Vidage de silos de collecte

Les capacités des silos de collecte (satellites) ne sont pas suffisantes pour garantir la réception convenable de céréales livrées sur plusieurs jours de récolte. En vue d'assurer une réception fluide et un stockage adéquat auprès des silos de collecte, un transfert régulier des céréales vers les silos d'expédition est alors organisé (*cf.* Fig. 3.3), lorsque :

- parmi les ressources de transport appartenant à la flotte de véhicules de la coopérative, il y en a au moins une disponible ;
- au moins une cellule d'un silo de collecte n'est pas vide.

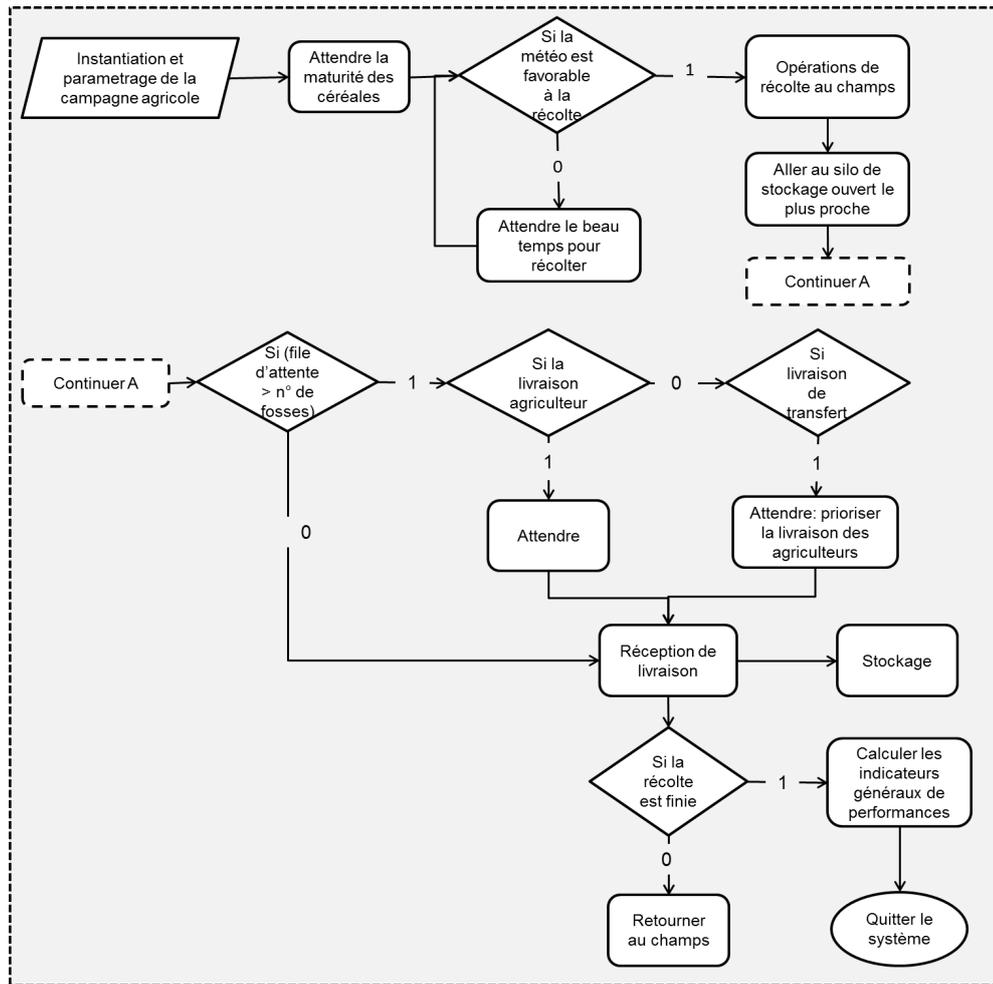


FIGURE 3.2 – Modélisation de la chaîne logistique : livraison et stockage

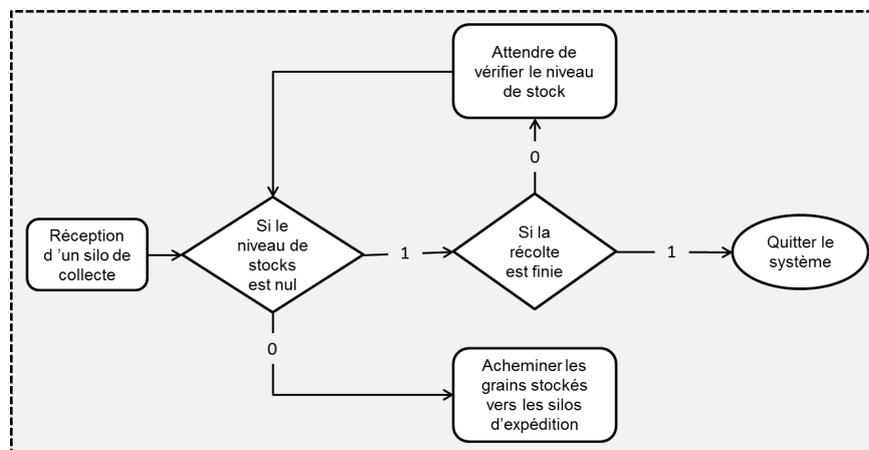


FIGURE 3.3 – Modélisation de la chaîne logistique : vidage des silos de collecte

File d'attente

Dans la configuration actuelle de la chaîne logistique agricole, où les chantiers agricoles peuvent assurer un processus continu de récolte dans les champs, les files d'attente auprès de silos de stockage peuvent affecter la synchronisation entre les opérations effectuées dans les champs et celles de réception de céréales, en raison de plusieurs facteurs : (i) nombre réduit de fosses par rapport à la gamme large de variétés à stocker ; (ii) débits limités des fosses de réception ; etc. La congestion de véhicules auprès de silos de stockage peut ainsi entraîner une perte de productivité des ressources de récolte dans les champs.

Considérons donc un système de file d'attente pour chaque silo de stockage s ($s = \overline{1, S}$), qui peut servir trois classes de bennes : *transfert* (provenant de silos de collecte et concernant uniquement les silos d'expédition), *agriculteur-adhérent* et *agriculteur-client*. Chaque silo de stockage s ($s = \overline{1, S}$) possède F_s fosses (serveurs) de débit limité r_{sf} , $s = \overline{1, S}$ et $f = \overline{1, F_s}$.

Les temps d'inter-arrivées entre les bennes des adhérents sont supposés suivre une loi exponentielle de paramètre λ_1 , et respectivement les temps d'inter-arrivées entre les bennes des agriculteurs-clients sont également définis par une loi exponentielle mais de paramètre λ_2 . Contrairement aux processus stochastiques décrivant les inter-arrivées des agriculteurs, adhérents et clients, les bennes de transfert sont coordonnées au sein de la coopérative de telle manière à ne pas perturber la réception des livraisons des agriculteurs. Si les bennes de transfert arrivent en même temps que les bennes des agriculteurs, ces derniers sont servis en priorité.

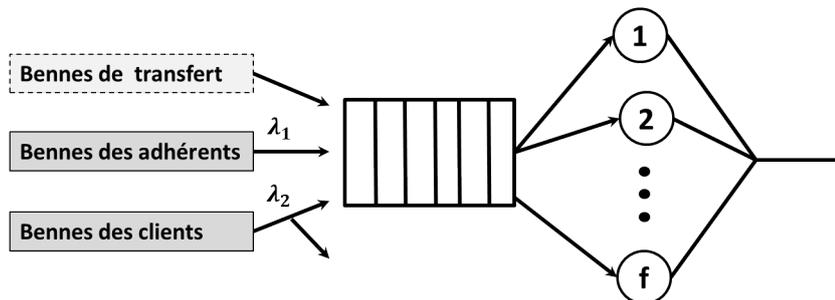


FIGURE 3.4 – Système de file d'attente auprès des silos de stockage

Par conséquent, la discipline de service entre les bennes des agriculteurs et de transfert est avec préemption (PR) en faveur des agriculteurs, adhérents ou clients. En contrepartie, la discipline de service des réceptions des livraisons des agriculteurs, adhérents et clients, est basée sur le principe *premier entré, premier servi* ($FIFO$).

Le temps de réception d'une benne (temps de service) t_{service} est déterminé en fonction de la quantité livrée q et le débit de la fosse f du silo de stockage s . Le débit du système de file d'attente au silo s est alors déterministe (D) et il est calculé selon l'expression : $t_{\text{service}} = \frac{q}{r_{sf}}$.

Le nombre total des agriculteurs et des bennes de transfert à desservir (population de la file d'attente) est considéré fini et donné par H . Le débit des arrivées de bennes des agriculteurs est alors une fonction de nombre de bennes à réceptionner dans le cadre du système étudié. Dénotons la population de la file d'attente, qui est composée de deux classes de bennes, adhérents et clients, par $\lambda_1(N)$ et $\lambda_2(M)$, où N représente le nombre total connu des adhérents et M le nombre maximum attendu de bennes de clients à

réceptionner.

Le système de file d'attente auprès de silo de stockage s est borné par F_s , *i.e.* par son nombre de fosses F_s . De plus, considérons un paramètre de la file d'attente B , indiquant la capacité du système, *i.e.* le nombre de bennes qui peuvent simultanément s'y trouver. Ceci signifie que si une benne des clients arrive dans le système et que la file d'attente est complète, alors le client en question est perdu (il n'entre pas dans le système).

En résumé et conformément à la notation de Kendall (processus d'arrivée/ processus de sortie/ nombre de serveurs/ capacité totale du système/population totale de clients/ discipline de service), la forme de la file d'attente auprès de silos de stockage s est la suivante : $M/D/F_s/F_s + B/H/FIFO(PR)$, et peut être illustrée tel que montré dans la Fig. 3.4. Il convient juste de noter qu'aucune benne de transfert n'est à réceptionner aux silos de collecte, celle-ci étant spécifique uniquement aux silos d'expédition.

Séchage

Au cours du stockage, la qualité des grains s'altère rapidement, s'ils sont conservés trop humides. En effet, les céréales atteignent leur maturité physiologique, lorsqu'elles cessent de pousser et accumulent davantage de matière sèche. À cette phase de leur développement, les grains sont encore des organismes vivants et, comme ils respirent, il y a une production de chaleur, d'eau et de gaz carbonique. La perte de matière sèche est d'autant plus significative que la teneur en eau est élevée et la respiration plus importante. C'est pour cette raison que les céréales devraient avoir une teneur en eau optimale avant d'être stockées (par exemple, pour le maïs, le mil et le sorgho cette teneur doit être de 15 % au maximum).

Juste après la récolte, le séchage a donc pour vocation de ramener les grains de leur teneur en eau à la collecte à celle de conservation. La conservation des céréales dans un silo de stockage ne sera ensuite possible sans dommage que si la température des grains est suffisamment basse (ARVALIS, 2003).

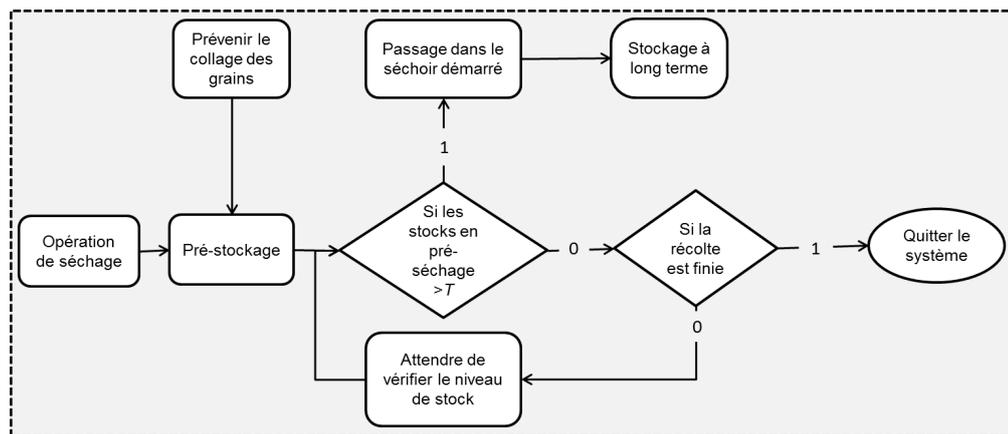


FIGURE 3.5 – Modélisation de la chaîne logistique : opération de séchage

Avant d'être proprement-parlant préparées pour une conservation conforme, les céréales livrées dans un silo sont ainsi stockées sur un site de pré-séchage. Une fois les séchoirs l ($l = \overline{1, L}$) d'une capacité limitée T_l sont réglés et une quantité raisonnable de céréales pré-stockée est atteinte, l'opération de séchage peut alors être entamée.

Afin d'éviter le collage des grains sur les sites de pré-séchage, les céréales doivent être mélangées au moins chaque 24 heures si leur durée de pré-stockage dépasse ce délai. Il est à noter que la durée de pré-stockage représente le délai qui s'écoule entre la récolte au champ d'un lot de céréales et son passage dans le séchoir, la durée d'attente sur le site de pré-séchage étant également couplée.

3.3.3 Instanciation et paramétrage

Une *instance* du modèle de simulation à événements discrets décrit plus-haut (cf. sous-sections 3.3.1 et 3.3.2) représente une campagne agricole spécifique, dont les données d'entrée comportent les informations relatives aux : chantiers agricoles ; organismes stockeurs ; informations météorologiques probabilisées relatives aux disponibilités journalières de récolte (un jour est considéré *disponible*, si aucune pluie n'est prévue le jour même). Le paramétrage des caractéristiques liées à la saison de récolte doit être également effectué ainsi que l'ajustement des composantes physiques propre à chaque expérimentation de simulation.

En dépit de nombreux avantages, la simulation présente cependant des limites. N'étant pas une technique d'optimisation au sens propre, elle n'est pas capable de prendre des décisions optimales dans un ensemble admissible de solutions, permettant uniquement d'envisager et de vérifier l'arborescence des choix possibles définis par l'utilisateur. En tout état de cause, nous avons défini les régulations suivantes lorsque la prise de décision est requise dans le cadre du pilotage de la chaîne logistique agricole étudiée :

- ❑ *choix de silo de stockage* : la règle du plus proche silo de stockage est appliquée, sauf mention contraire (certaines variétés sous contrats spécifiques sont acceptées uniquement dans de silos de stockage prédéfinis) ;
- ❑ *choix de parcelle à récolter* : les parcelles posant des risques de dégradation plus importants (dans le cas d'égalité d'indices de dégradation, le choix de parcelles se fait en ordre croissant de leurs identifiants associés) ;
- ❑ *stockage dans les cellules des silos de stockage* : le stockage des céréales dans les cellules se fait selon le principe de la meilleure compatibilité entre les variétés, en définissant une matrice de notes de compatibilité entre les variétés susceptibles d'être reçues par les silos de stockage, allant de 0 (non-compatible) à C (très compatible). De plus, une matrice binaire de compatibilité (1), et respectivement d'incompatibilité (0) entre cellule et variété est également définie pour servir à éliminer certains choix de cellule de stockage pour une variété donnée.
- ❑ *choix de cellule de silo de collecte à vider* : deux règles sont mises en place, à savoir les plus remplies et les moins remplies ; en revanche, le choix de silo de collecte à vider se fait selon le principe du plus saturé en priorité.

Il est important également de préciser que le type d'expérimentation en simulation de la chaîne logistique agricole étudiée est à *horizon fini* (i.e. terminatif) (Law and Kelton, 2000). La simulation s'exécute jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de parcelles à récolter et de quantités de céréales à stocker.

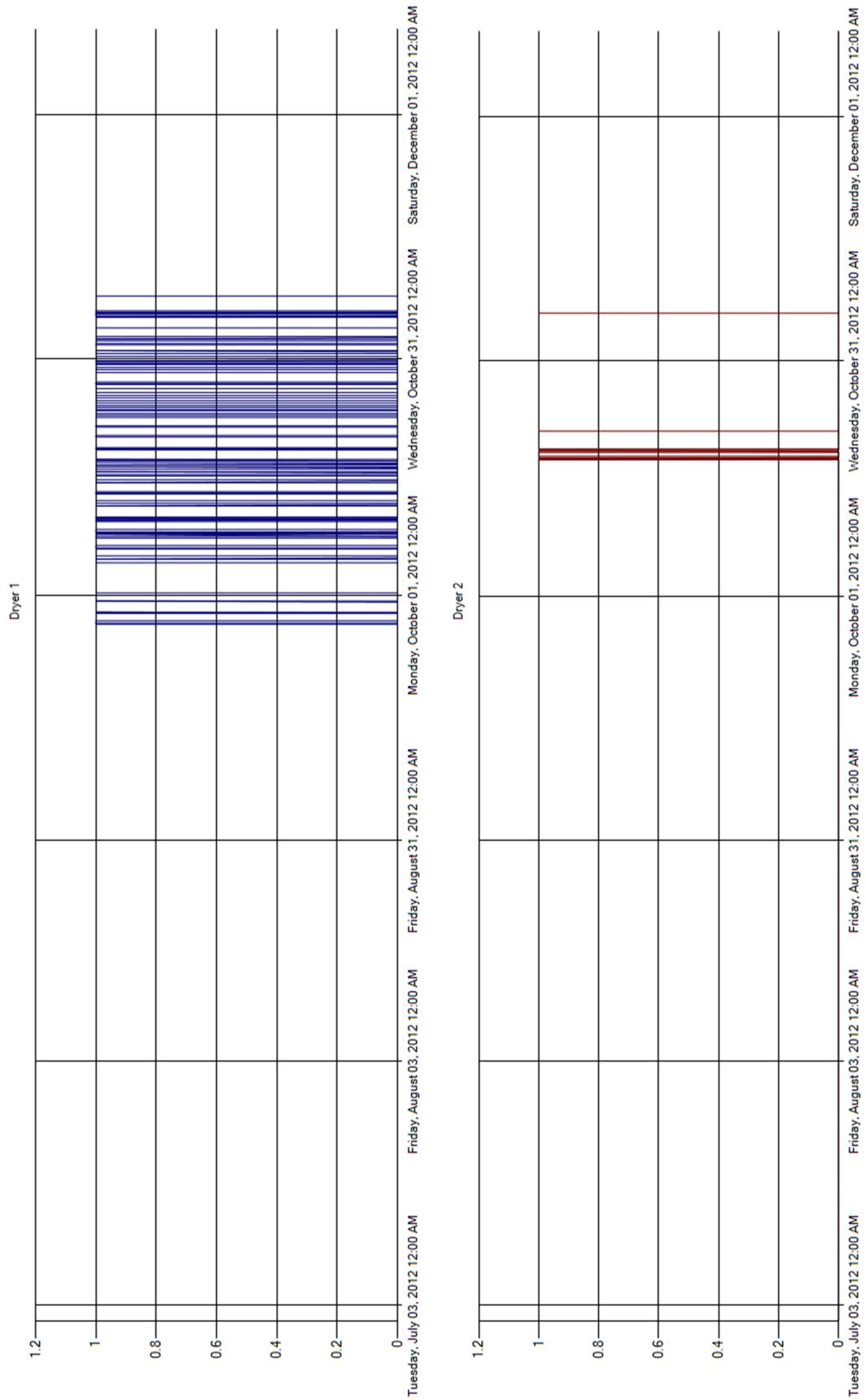


FIGURE 3.6 – Résultats numériques : activité des séchoirs

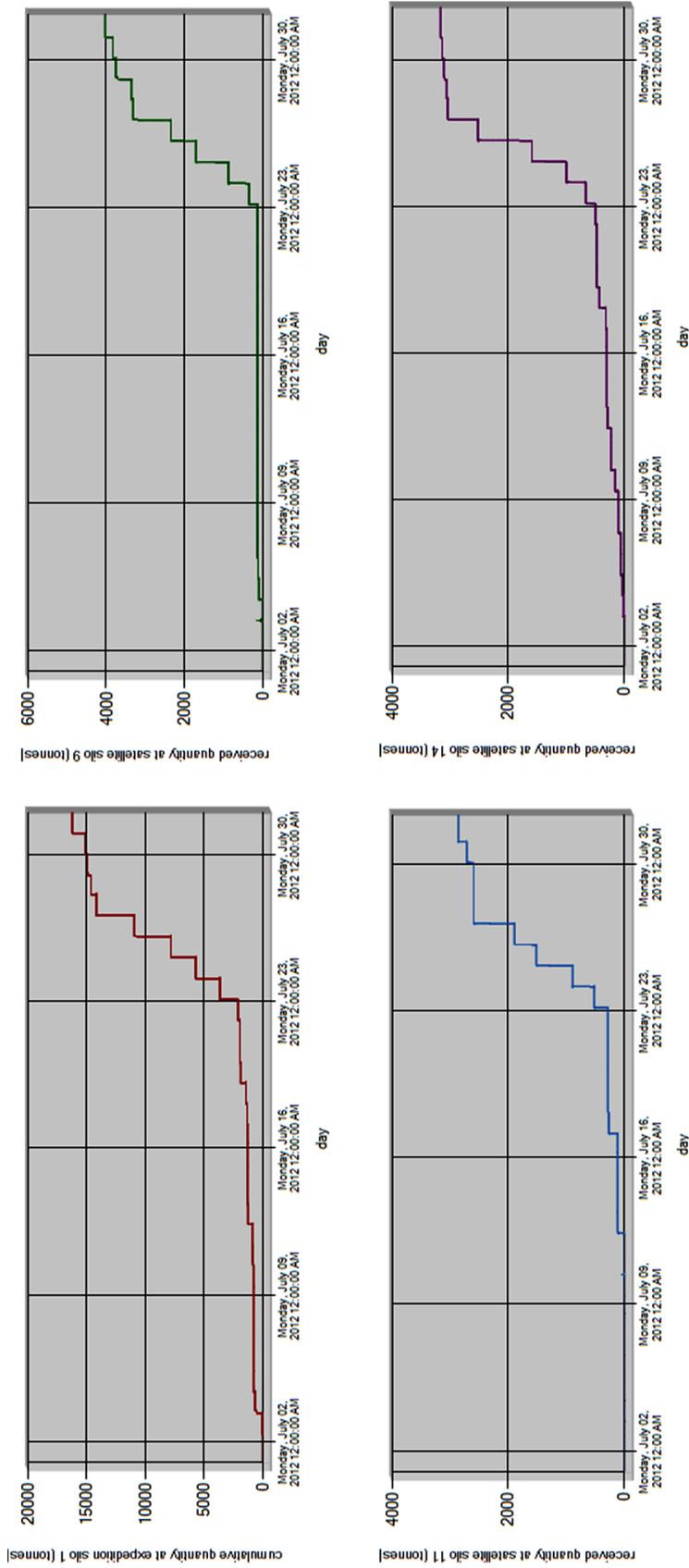


FIGURE 3.7 – Résultats numériques : activité de stockage

3.4 Résultats numériques

Un des problèmes rencontrés dans la chaîne logistique de la coopérative en question est le pilotage de flux de céréales depuis les champs jusqu'aux silos d'expédition. Le périmètre concerné comporte environ 300 exploitations agricoles disposant chacune d'un parc mécanique de débit différent. Les quantités collectées sont soit acheminées vers de silos de collecte (environ 60-65 % des tonnages), soit vers de silos d'expédition.

Les silos de collecte sont répartis sur 11 sites. Les quantités stockées dans ces derniers sites sont ensuite expédiées vers des silos d'expédition de plus grande capacité (3 sur le territoire concerné par l'étude). Les acheminements directs (*i.e.* sans transit par les silos de collecte) vers des silos d'expédition sont également possibles (35-40 % des tonnages) et sont de plus encouragés.

Le modèle de simulation tel qu'il a été défini dans la section 3.3 a été implémenté à l'aide du logiciel de simulation Rockwell-Arena (version 13.0), qui représente la version graphique du langage de simulation de type *interaction de processus* SIMAN (*SIMulation LANguage for modeling general systems*) (Altiok and Melamed, 2007). Les expérimentations numériques ont été effectuées sur une machine Intel(R) Core(TM) i7-2720QM CPU à 2.20GHz.

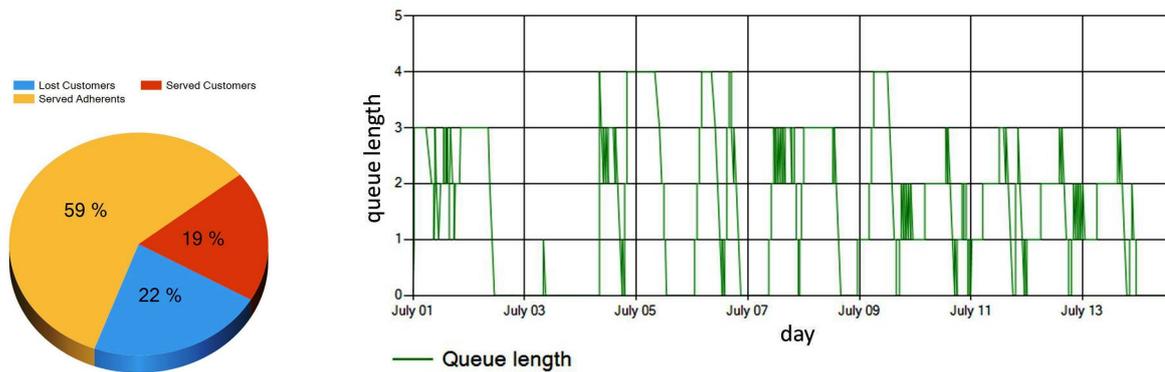


FIGURE 3.8 – Résultats numériques : *file d'attente à un silo de stockage*

Sans restreindre la portée générale de ce qui précède, lançons la simulation à événements discrets correspondant à une campagne agricole effectuée dans une zone géographique gérée par la coopérative sous-étude, comportant : un silo d'expédition, 3 silos de collecte et plus de 1100 parcelles. Plusieurs analyses peuvent être extraites quant au déroulement et à la performance de la chaîne logistique. À ce titre, la Fig. 3.8 montre le niveau de réception d'un silo de stockage. Il est de toute évidence qu'une connaissance plus précise des variétés et quantités à livrer, pourrait faciliter les réceptions et minimiser les files et temps d'attente auprès des silos de stockage, dont le remplissage est illustré dans la Fig. 3.7.

Du côté des agriculteurs, la Fig. 3.10 permet de suivre le taux variable d'utilisation d'un chantier agricole lors d'une campagne agricole, tandis que la Fig. 3.9 souligne les risques cumulés de dégradation des céréales enregistrés au moment de la récolte. Ces derniers ont été calculés en tant que l'écart entre la date de maturité physiologique et celle de la récolte et servent à donner des informations quant à l'exposition des céréales aux différents risques de dégradation de la qualité ou du rendement (causés par pluies, surmaturité, organismes nuisibles, etc.).

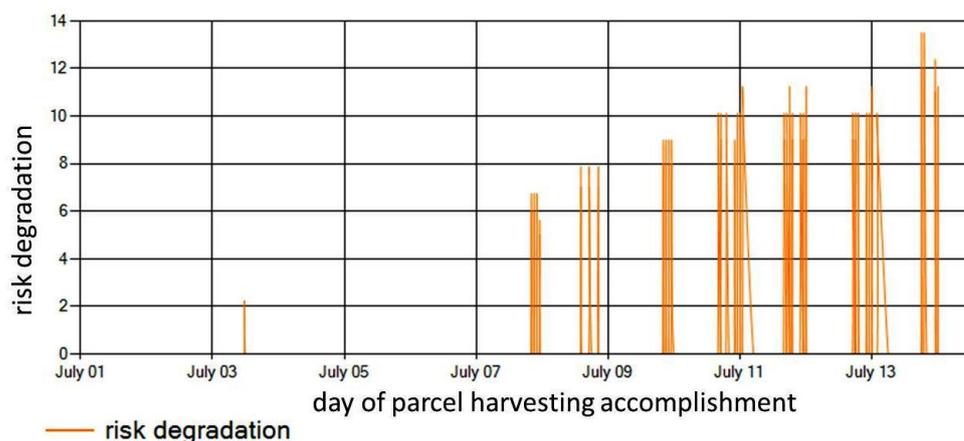


FIGURE 3.9 – Résultats numériques : *évolution des risques cumulés de dégradation de la qualité des céréales collectées*

En ce qui concerne le maïs, les grains sont préalablement séchés afin d'assurer une conservation appropriée. Dans ce sens, la Fig. 3.6 illustrent l'activité, et respectivement l'inactivité de deux séchoirs. Tel que la suggère les multiples fluctuations de démarrage/arrêt des séchoirs, l'activité de séchage n'est pas optimisée, supposant ainsi une consommation d'énergie qui peut être réduite grâce à une meilleure gestion des flux récoltés.

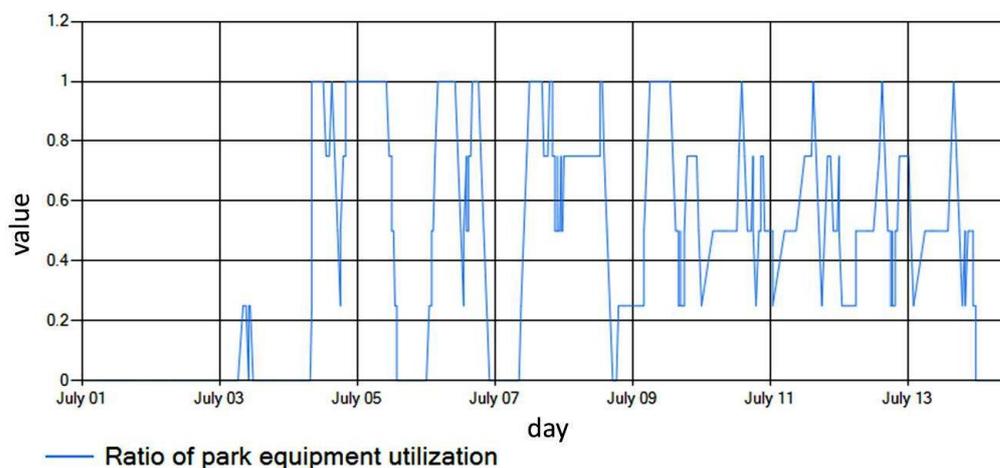


FIGURE 3.10 – Résultats numériques : *le taux d'utilisation d'un chantier agricole*

Bien entendu, les résultats ci-reportés ne sont que quelques exemples de sortie de la simulation. À ce stade de l'étude, nous ne nous intéressons pas à l'évaluation plus profonde de performance du modèle de simulation à événements discrets ci-présenté, ni à l'analyse des scénarios potentiels. Avant de ce faire, nous nous proposons de surmonter certaines limites de la simulation (*cf.* sous-section 3.3.3) dans les quatre chapitres à venir.

3.5 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons construit un modèle de simulation à événements discrets permettant l'appréhension et le pilotage de la chaîne logistique dans son état actuel. Afin de vérifier ses possibilités et ses limites, l'évolution et plusieurs résultats de simulation d'une campagne agricole sont apportés et discutés. Tel que le montrent les expérimentations numériques, la simulation nous permet de suivre le déroulement de l'activité de récolte en *temps réel* de simulation dans son intégralité, en prenant en compte les éléments stochastiques inhérents au système agricole (météo, file d'attente aux silos de stockages).

Une fois que le cadre de l'application industrielle est élaboré *via* le modèle de simulation à événements discrets, des améliorations potentielles sont repérées selon les axes suivants :

- gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales avant stockage dans les silos pendant la période de récolte ;
- déclenchement des opérations de vidage afin d'assurer une réception fluide et un stockage adéquat aux silos de collecte ;
- analyse de plusieurs scénarios, qui correspondent à la fermeture/ouverture d'une ou plusieurs implantations physiques de stockage intermédiaire.

Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : *cas statique*

“ L’agriculture de demain se dessine aujourd’hui et nous devons être l’un des acteurs principaux. En collaboration avec les adhérents et certains de nos partenaires, la SCARA mène des démarches actives pour occuper une place de choix dans l’innovation et l’agriculture durable. C’est primordial pour conserver notre différenciation et continuer à proposer à nos clients des produits toujours meilleurs et à nos adhérents des conditions encore plus favorables...”

Philippe MICHONNEAU, Responsable Pôle Agronomie, Innovation, Services, SCARA

”

Sommaire

4.1 Introduction	45
4.2 Description du problème et modélisation mathématique	47
4.2.1 Programmation sous contraintes probabilistes jointes	48
4.2.2 Programmation mixte en nombres entiers	50
4.3 Une approche basée sur la réduction des scénarios	52
4.4 Reformulation mixte en nombres entiers et le concept de pertinence-$(1 - \alpha)$	55
4.5 Résultats numériques	58
4.6 Conclusions et perspectives	62

4.1 Introduction

La récolte, aboutissement d’une année de production, représente l’étape primordiale dans le circuit de la production céréalière, en raison de son coût élevé et de l’incidence considérable sur la quantité et la qualité des céréales. Les moissons prématurées ou tardives, les techniques inappropriées de collecte et/ou le stockage inadéquat sont quelques facteurs qui peuvent compromettre substantiellement la réussite d’une campagne agricole.

Pourtant, c'est la météo capricieuse qui cerne les contraintes et le contexte de récolte. Avant la récolte proprement dite, les mauvaises conditions climatiques peuvent causer des retards importants dans le développement des céréales, en affectant irréversiblement de ce fait leur qualité intrinsèque et/ou le rendement de récolte. Pendant la saison de moisson en revanche, ce sont déjà les pluies qui empêchent les agriculteurs d'accéder à leurs parcelles, fait qui tergiverse le processus de récolte en exposant *ipso facto* les céréales à des risques de dégradation au champ (rancidité, moisissures, chute d'épis, développement des micro-organismes, casse des tiges, etc.).

En vue de répondre à des objectifs de rentabilité financière, nous nous intéressons dans ce chapitre à la planification d'une récolte fructueuse, favorable à un rendement correct et à une qualité qui valorise le potentiel des grains développés. Ainsi, un modèle stochastique sera élaboré, dans le but de minimiser les risques de dégradation de la qualité des céréales pendant la période de moisson. Celui-ci sera abordé ultérieurement par des techniques de réduction des scénarios (utilisés pour représenter les aléas météorologiques) *via* des contreparties linéaires équivalentes, spécialement développées à cet effet.

Il existe diverses approches pour faire face aux incertitudes, notamment lorsque la connaissance probabiliste les caractérisant est disponible. Les principaux paradigmes de modélisation et de résolution des problèmes comportant des paramètres aléatoires exprimés explicitement par des distributions de probabilité, sont basés sur les modèles stochastiques suivants : **(i)** modèles avec ou sans recours, **(ii)** modèles avec des contraintes probabilistes jointes (intégrées) ou séparées (indépendantes), ainsi que **(iii)** la combinaison de ces deux (Shapiro et al., 2009; Kall and Wallace, 1994). La première famille de modèles stochastiques optimise un critère de type espérance mathématique, tandis que la deuxième famille met un ensemble de contraintes en probabilités, s'intéressant ainsi à la recherche de solutions conformes, qui résistent au mieux aux éventuelles manifestations des aléas.

Dans ce chapitre et en conformité avec la nature des éléments aléatoires qui interviennent dans le problème de planification de l'activité de récolte, nous nous intéressons tout particulièrement à la programmation sous contraintes probabilistes jointes. C'est à partir des travaux de Charnes and Cooper (1959) datant des années '50, où elle est évoquée sous le nom de *joint chance constrained programming*, que la programmation sous contraintes probabilistes jointes attire l'attention de la communauté scientifique (Miller and Wagner (1965); Dentcheva et al. (2002, 2000); Zhang et al. (2014), etc.). Souvent appropriée dans un contexte industriel, cette approche permet de rendre fiable, jusqu'à un certain niveau de confiance prescrit, le système de contraintes probabilistes de manière à ce que les décisions obtenues soient réalisables dans une conjoncture incertaine.

Tout d'abord, la description détaillée du problème ainsi que sa modélisation mathématique sous la forme d'un programme stochastique sont données dans la section 4.2. En utilisant les résultats présentés par Shapiro et al. (2009) et Dentcheva et al. (2000), une reformulation équivalente mixte en nombres entiers est développée dans la sous-section 4.2.2. En raison de sa complexité exponentielle, des stratégies fondées sur la réduction de scénarios seront utilisées pour résoudre le problème étudié. Dans ce sens, deux approches proposées par Heitsch and Römisch (2007) seront donc rappelées dans la section 4.3 et ultérieurement implémentées. Soucieux d'atténuer la complexité du programme linéaire développé, dans la section 4.4, nous introduisons le concept de $(1 - \alpha)$ -*pertinence* à travers duquel une nouvelle reformulation alternative mixte en nombres entiers est proposée. La section 4.5 rapporte les résultats obtenus et présente une étude comparative des modèles mathématiques et des approches de résolution proposés. Finalement, une conclusion et des perspectives envisageables dans la continuité de ce qui est présenté, clôturent ce chapitre en section 4.6.

4.2 Description du problème et modélisation mathématique

Tel que mentionné auparavant, c'est l'activité de la collecte qui est concernée dans ce chapitre. Les agriculteurs procèdent à la moisson dès que les grains ont atteint leurs stades de maturité physiologique. Tout en tenant compte des incertitudes météorologiques et dans l'intention de réduire les risques de dégradation de la qualité des céréales, une planification journalière réalisée au préalable permettra aux agriculteurs de mieux s'organiser pendant la période de récolte.

Pour ce faire, considérons I chantiers agricoles différents se référant à une coopérative agricole. Chaque chantier i , $i = \overline{1, I}$ possède P_i parcelles, chaque parcelle p comportant qu'une seule variété. La quantité à collecter de chaque parcelle q_{ip} est supposée connue et dépend de la surface semée et du rendement de production, estimé après le stade de développement des grains. En outre, les dates de maturité physiologique d_{ip} pour toutes les parcelles p se rattachant au chantier i , sont considérées connues juste avant la récolte avec une précision satisfaisante. L'horizon de temps nécessaire pour effectuer la récolte est constitué de J périodes de temps (jours, dans notre application).

Récolter à la maturité optimale est une prescription importante pour réduire le taux d'humidité des céréales et pour diminuer les risques de dégradation de leur qualité intrinsèque aux différents stades du stockage et/ou de la commercialisation. Représentons alors par r_p^a et r_p^b les indicateurs de dégradation lorsque les produits agricoles provenant de la parcelle p sont collectés avant, et respectivement, après leurs stades de maturité physiologique optimale.

Tableau 4.1 – Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : notations

Paramètres :	
$i, (i = \overline{1, I})$	chantier agricole
$p, (p = \overline{1, P_i})$	parcelle
$j, (j = \overline{1, J})$	période de temps (jour)
$\omega, (\omega \in \Omega)$	scénario de disponibilité de jour de récolte pendant l'horizon de collecte considéré
Données :	
ξ_j^ω	disponibilité de récolte de jour j dans le scénario ω
d_{ip}	date de maturité physiologique
r_p^a	indicateur de dégradation dans le cas de récolte tardive de la parcelle p
r_p^b	indicateur de dégradation dans le cas de récolte prématurée de la parcelle p
q_{ip}	quantité à récolter de la parcelle p par le chantier agricole i
c_i	capacité journalière de récolte du chantier agricole i
M	grande constante (e.g. supérieure à $\sum_{i=1}^I P_i$)
Variables :	
x_{ipj}	proportion de la parcelle p récoltée le jour j par le chantier agricole i
z_{ipj}^b	dénote le fait que la parcelle p du chantier agricole i est récoltée avant le stade de maturité physiologique en prenant la valeur 1, et 0 sinon
z_{ipj}^a	dénote le fait que la parcelle p du chantier agricole i est récoltée après le stade de maturité physiologique en prenant la valeur 1, et 0 sinon
g_{ipj}	prend la valeur 0 si aucune parcelle n'est récoltée par le chantier agricole i le jour j et la valeur 1, sinon
o_j	vaut 0 si aucune parcelle n'est récoltée le jour j et la valeur 1, sinon

Chaque chantier agricole a une capacité journalière de récolte limitée, qui peut être déterminée en fonction de la dimension et du rendement mécanique de ses équipements agricoles utilisés dans le processus de récolte, ainsi que de la proximité des silos de stockage. Ainsi, aucun chantier agricole i ne peut collecter une quantité supérieure à c_i par jour.

Les pluies ont un effet néfaste sur le bon déroulement de la collecte des céréales. À ce propos, en utilisant les données fournies par les stations météorologiques, se référant au volume des précipitations pendant la saison de récolte, il est possible de disposer d'information probabiliste sur la disponibilité des jours de récolte. Plus précisément, un jour sans pluie est considéré comme étant disponible pour effectuer les opérations relatives à la récolte. Ainsi, représentons la disponibilité journalière de récolte par une variable aléatoire, indépendante et binaire ξ_j ($j = \overline{1, J}$), qui prend la valeur 1 s'il est possible de récolter le jour j , et 0, sinon. Ces variables sont décrites par leurs distributions discrètes : $D_j = \{(\xi_j^k, \mathbb{P}(\xi_j^k)), k = \{0, 1\}\}$, $\forall j = \overline{1, J}$. L'ensemble des scénarios ω , décrivant les incertitudes météorologiques tout au long de l'horizon de récolte J , est désigné par Ω , où $\omega = (\xi_1^\omega, \dots, \xi_J^\omega)$, et leurs probabilités jointes associées sont données

$$\text{par : } \mathbb{P}(\omega) = \prod_{j=1}^J \mathbb{P}(\xi_j^\omega), \forall \omega \in \Omega.$$

La variable de décision réelle x_{ipj} ($0 \leq x_{ipj} \leq 1$) représente la partie de la parcelle p récoltée le jour j . De plus, la variable de décision z_{ipj}^b vaut 1, si la parcelle p de l'agriculteur i est récoltée avant le stade de maturité physiologique et la valeur 0, sinon. Respectivement, z_{ipj}^a prend la valeur 1 si la parcelle p de l'agriculteur i est récoltée après le stade de maturité physiologique et la valeur 0, sinon. La variable binaire g_{ipj} est égale à 1, si la parcelle p est récoltée le jour j par le chantier i , et 0 sinon. La variable o_j vaut 0 si le jour j aucune parcelle n'est récoltée, et 1 dans le cas contraire. La fonction-objectif du problème consiste à minimiser les risques de dégradation de la qualité des produits céréaliers, compte-tenu de la maturité physiologique dans les deux cas de collecte : prématurée et/ou tardive.

Avant de procéder à la modélisation mathématique, énumérons les constatations qui en ressortent aisément : **(i)** il n'y a pas de recours quantifiable à considérer ; **(ii)** la fonction-objectif n'est pas affectée explicitement par les variables aléatoires ξ_j^ω ; **(iii)** les incertitudes ne vont apparaître que dans le second membre des contraintes, propriété qui ne rend pas, d'ailleurs, le problème plus facile. L'approche de modélisation se dégageant comme la plus appropriée pour ce genre de problème s'avère donc être la programmation stochastique sous contraintes probabilistes jointes (Shapiro et al., 2009; Kall and Wallace, 1994), dont la mise en application est détaillée plus amplement dans la section qui suit juste après.

4.2.1 Programmation sous contraintes probabilistes jointes

Dans la perspective de la programmation sous contraintes probabilistes, le principal challenge consiste à trouver la meilleure solution, qui optimise un objectif considéré et reste à la fois fiable dans la plupart des réalisations des aléas. À cet égard, spécifions dans le modèle mathématique un niveau de confiance (*i.e.* une tolérance acceptable) de $(1 - \alpha)$, où $\alpha \in (0, 1)$ représente le seuil désiré pour la validation des contraintes probabilistes. En considérant par la suite les variables de décision et les données énoncées précédemment (*cf.* le tableau 4.1), nous proposons un modèle stochastique sous contraintes probabilistes jointes, dont uniquement les éléments du second membre des contraintes sont impactés par des aléas, décrits à leur tour par des distributions de probabilités discrètes données :

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \{r_p^a \cdot z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) - r_p^b \cdot z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip})\} \quad (4.1)$$

sous contraintes : (4.2)

$$\sum_{j=1}^J x_{ipj} = 1, \quad \forall i, \forall p \quad (4.3)$$

$$\sum_{p=1}^{P_i} x_{ipj} \cdot q_{ip} \leq c_i, \quad \forall i, \forall j \quad (4.4)$$

$$\mathbb{P}(x_{ipj} \leq \xi_j^\omega, \forall i, \forall p, \forall j, \forall \omega) \geq 1 - \alpha, \quad (4.5)$$

$$z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip}) \leq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.6)$$

$$z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.7)$$

$$z_{ipj}^a + z_{ipj}^b \geq x_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.8)$$

$$o_j \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.9)$$

$$M \cdot o_j \geq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.10)$$

$$M \cdot x_{ipj} \geq g_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.11)$$

$$x_{ipj} \leq g_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.12)$$

$$g_{ipj} \geq g_{ip(j-1)} - \sum_{j'=1}^{j-1} x_{ipj'} + o_j - 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j > 1 \quad (4.13)$$

$$0 \leq x_{ipj} \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.14)$$

$$o_j, g_{ipj} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.15)$$

$$z_{ipj}^a, z_{ipj}^b \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.16)$$

Puisque chaque parcelle doit être intégralement récoltée, les contraintes (4.3) sont imposées. Les contraintes (4.4) assurent que la quantité journalière totale récoltée par le chantier agricole i n'excède pas sa capacité de récolte c_i . La contrainte non-linéaire (4.5) n'est entachée par les incertitudes relatives aux disponibilités des jours de récolte que dans le second membre et peuvent être violées au plus α fois (*i.e.* la non-satisfaction de la contrainte (4.5) est tolérée dans α cas). Les contraintes (4.6), (4.7) et (4.8) garantissent que la variable binaire z_{ipj}^b vaut 1, si la parcelle p se rattachant au chantier agricole i est récoltée avant son stade de maturité physiologique optimale, et respectivement, z_{ipj}^a prend la valeur 1 si la parcelle p du chantier i est collectée après sa maturité. Les contraintes (4.9) et (4.10) forcent les variables o_j à prendre la valeur 0 si aucune parcelle n'est récoltée le jour j et la valeur 1, dans le cas contraire.

Pour des raisons économiques, les contraintes (4.11), (4.12) et (4.13) obligent à continuer le processus de récolte sur une parcelle p une fois la collecte entamée sur cette parcelle. Néanmoins, le changement de parcelle est autorisé après un jour de pluie, *i.e.* une fois la moissonneuse-batteuse est inévitablement arrêtée.

4.2.2 Programmation mixte en nombres entiers

Afin de pouvoir résoudre le modèle non-linéaire avec contraintes probabilistes jointes formalisé dans la section précédente, une reformulation linéaire équivalente sera présentée dans cette sous-section. En nous inspirant des résultats théoriques proposés par [Dentcheva et al. \(2000\)](#), introduisons les variables binaires λ_ω , associées à chaque scénario ω , ($\omega \in \Omega$), qui prennent la valeur 1 si la contrainte probabiliste (4.5) est satisfaite pour le scénario ω et ceci $\forall i$ ($i = \overline{1, I}$), $\forall p$ ($p = \overline{1, P_i}$), $\forall j$ ($j = \overline{1, J}$), et respectivement la valeur 0, sinon. De cette manière, la contrainte (4.5) peut être réécrite par les contraintes déterministes suivantes :

$$(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) - (\xi_j^\omega - \lambda_\omega) \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j, \forall \omega \quad (4.5a)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \mathbb{P}(\omega) \cdot \lambda_\omega \geq 1 - \alpha \quad (4.5b)$$

Montrons maintenant l'équivalence entre la contrainte stochastique (4.5) et les contraintes déterministes (4.5a) et (4.5b).

Proposition 4.1. *La contrainte probabiliste jointe (4.5) est correctement exprimée par les contraintes (4.5a) et (4.5b), ce qui signifie que $|\Omega|$ -inégalités de type (4.5) sont simultanément satisfaites avec un niveau de confiance au moins égal à $(1 - \alpha)$.*

Démonstration. Vérifions que les contraintes (4.5a) et (4.5b) traduisent via les variables λ_ω ($\omega \in \Omega$) la satisfaction et respectivement, la non-satisfaction de la contrainte probabiliste (4.5), avec un niveau de confiance donné de $(1 - \alpha)$. En conformité avec la définition des variables binaires λ_ω , $\forall \omega \in \Omega$:

$$\lambda_\omega = \begin{cases} 1, & \text{si les contraintes (4.5) sont satisfaites pour le scénario } \omega \text{ et } \forall i, \forall p, \forall j \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Examinons donc de manière exhaustive toutes les quatre situations possibles qui peuvent être envisagées pour exprimer la relation entre la satisfaction/non-satisfaction de la contrainte probabiliste (4.5) et les variables λ_ω , pour toutes les parcelles p ($p = \overline{1, P_i}$) se rattachant au chantier agricole i ($i = \overline{1, I}$), pour tous les jours j ($j = \overline{1, J}$), et pour chaque scénario ω ($\omega \in \Omega$), avec un niveau de confiance de $(1 - \alpha)$. Supposons alors que :

- le jour j aucune parcelle n'est récoltée, mais il est possible de récolter le jour même dans le scénario ω (i.e. $\xi_{ij}^\omega = 1$), la contrainte probabiliste (4.5) est donc satisfaite pour ce scénario, car : $(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) = 0$ et $\xi_j^\omega = 1 \implies \lambda_\omega \leq 1$. En vertu de la contrainte (4.5b), λ_ω sera alors égal à 1 afin de contribuer à garantir le niveau de confiance prescrit.
- le jour j aucune parcelle n'est récoltée, et de plus, il n'est pas possible de récolter le jour même dans le scénario ω (i.e. $\xi_{ij}^\omega = 0$), la contrainte probabiliste (4.5) est donc satisfaite pour ce scénario, car : $(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) = 0$ et $\xi_j^\omega = 0 \implies \lambda_\omega \leq 1$. En vertu de la contrainte (4.5b), λ_ω sera alors égal à 1 afin de contribuer à garantir le niveau de confiance prescrit.
- le jour j la parcelle p du chantier agricole i est récoltée, et de plus, il est possible de récolter le jour même dans le scénario ω (i.e. $\xi_{ij}^\omega = 1$), la contrainte probabiliste (4.5) est donc satisfaite pour ce

scénario, car : $(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) = 1$ et $\xi_j^\omega = 1 \implies \lambda_\omega \leq 1$. En vertu de la contrainte (4.5b), λ_ω sera alors égal à 1 afin de contribuer à garantir le niveau de confiance prescrit.

- le jour j la parcelle p du chantier agricole i est récoltée, mais il n'est pas possible récolter le jour même dans le scénario ω (i.e. $\xi_{ij}^\omega = 0$), la contrainte probabiliste (4.5) est donc violée pour ce scénario, car : $(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) = 1$ et $\xi_j^\omega = 0 \implies \lambda_\omega \leq 0$. D'autre part, λ_ω étant définie en tant que variable binaire, elle sera donc forcée de prendre la valeur 0.

□

De la sorte, le modèle stochastique vu dans la section précédente, peut être réécrit d'une façon déterministe en introduisant les variables λ_ω ($\omega \in \Omega$) et en substituant la contrainte probabiliste jointe (4.5) par ses homologues déterministes (4.5a) et (4.5b), comme formalisé ci-après :

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \{r_p^a \cdot z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) - r_p^b \cdot z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip})\} \quad (4.1)$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^J x_{ipj} = 1, \quad \forall i, \forall p \quad (4.3)$$

$$\sum_{p=1}^{P_i} x_{ipj} \cdot q_{ip} \leq c_i, \quad \forall i, \forall j \quad (4.4)$$

$$(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) - (\xi_j^\omega - \lambda_\omega) \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j, \forall \omega \quad (4.5a)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \mathbb{P}(\omega) \cdot \lambda_\omega \geq 1 - \alpha \quad (4.5b)$$

$$z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip}) \leq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.6)$$

$$z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.7)$$

$$z_{ipj}^a + z_{ipj}^b \geq x_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.8)$$

$$o_j \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.9)$$

$$M \cdot o_j \geq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.10)$$

$$M \cdot x_{ipj} \geq g_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.11)$$

$$x_{ipj} \leq g_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.12)$$

$$g_{ipj} \geq g_{ip(j-1)} - \sum_{j'=1}^{j-1} x_{ipj'} + o_j - 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j > 1 \quad (4.13)$$

$$0 \leq x_{ipj} \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.14)$$

$$o_j, g_{ipj} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.15)$$

$$z_{ipj}^a, z_{ipj}^b \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.16)$$

$$\lambda_\omega \in \{0, 1\}, \quad \forall \omega \quad (4.17)$$

Ce programme linéaire mixte en nombres entiers, noté dans ce qui suit par $\mathcal{P}(4.2.1)$, pose une difficulté majeure : un nombre large de scénarios, qui augmente exponentiellement avec la longueur de l'horizon de récolte J , fait qui implique respectivement un nombre exponentiel de variables et de contraintes. Ceci mène à ce qu'on appelle *malédiction de la dimensionnalité* (*curse of dimensionality*, en anglais) (Kuo and Sloan, 2005; Powell, 2007). Tout de même, ceci peut être contourné par des techniques de réduction de scénarios, approche devenue d'ailleurs classique (Kaut and Wallace, 2003). À ce titre, deux types de méthodes prédominent dans la littérature. L'un est fondé sur des approches d'échantillonnage de (Quasi-) Monte Carlo, dans le cadre desquelles le nombre de scénarios de l'ensemble réduit est déterminé statistiquement de façon à obtenir des solutions à l'intérieur des intervalles de confiance spécifiques pour un niveau de précision désiré (Shapiro et al., 2009). L'autre, quant à lui, exploite la notion de distance entre distributions probabilistes, fait qui permet de réduire l'ensemble de scénarios à ceux les plus plausibles de se manifester *de facto* (Heitsch and Römisich, 2003). Aux suggestions de Henrion et al. (2008), nous optons pour la deuxième approche, en lui consacrant la section suivante.

4.3 Une approche basée sur la réduction des scénarios

En raison de la complexité des programmes sous contraintes probabilistes, l'utilisation des techniques d'approximation basées sur la réduction des scénarios est souvent admise et justifiée dans la résolution des problèmes comportant des ensembles de scénarios de grandes tailles. Ces méthodes approchées rendent solvables les modèles de type (4.1) - (4.17), dont les dimensions augmentent exponentiellement avec le nombre de scénarios engendrés.

Théoriquement, la réduction de scénarios est un problème indépendant, mais dans la plupart des cas, il est indispensable pour résoudre un programme sous contraintes probabilistes, dont les données incertaines sont décrites par des distributions de probabilités discrètes.

Plutôt que de générer aléatoirement un sous-ensemble de scénarios traitable polynomialement, nous proposons de réduire l'ensemble des scénarios par l'élimination de ceux qui sont les plus improbables de se manifester *de facto*, selon des métriques de distributions probabilistes. Une des distances les plus utilisées entre distributions de probabilités discrètes données est rappelée ci-après.

Définition 4.2 (Heitsch and Römisich (2007)). *Soit P et Q deux distributions de probabilités discrètes d'un processus stochastique n -dimensionnel ω et respectivement $\tilde{\omega}$, ayant un nombre fini de scénarios $\omega_a \in \mathbb{R}^n$ avec ses probabilités p_a , ($a = \overline{1, |\Omega|}$) et respectivement, $\tilde{\omega}_b \in \mathbb{R}^n$ et ses probabilités associées q_b ($b = \overline{1, |\tilde{\Omega}|}$). Alors,*

$$D_K(P, Q) = \inf \left\{ \sum_{a=1}^{|\Omega|} \sum_{b=1}^{|\tilde{\Omega}|} \eta_{ab} c_T(\omega_a, \tilde{\omega}_b) : \right. \\ \left. \sum_{a=1}^{|\Omega|} \eta_{ab} = q_b, \forall b, \right. \\ \left. \sum_{b=1}^{|\tilde{\Omega}|} \eta_{ab} = p_a, \forall a, \right. \\ \left. \eta_{ab} \geq 0 \right\},$$

représente la distance Monge-Kantorovich entre deux distributions de probabilités finies P et Q , où $c_t(\omega_a, \tilde{\omega}_b) =$

$\sum_{\tau=1}^t \|\omega_a^\tau - \tilde{\omega}_b^\tau\|_n$ mesure la distance entre les scénarios ω_a et $\tilde{\omega}_b$ sur un horizon de temps t ($t = \overline{1, T}$) et $\|\cdot\|_n$ est une norme sur \mathbb{R}^n .

Autrement dit, D_K représente la distance entre deux distributions de probabilités discrètes, tandis que c_T mesure la distance entre les réalisations de scénarios le long de l'horizon de temps considéré, allant de 1 à T . En effet, la distance entre deux distributions de probabilités représente une sorte de compromis entre les probabilités des scénarios et les distances entre les réalisations de ces scénarios.

Ensuite, considérons P une distribution de probabilité discrète, composée de S scénarios ω_a ($a = \overline{1, S}$). De plus, soit \tilde{P} sa distribution probabiliste réduite constituée de scénarios ω_b pour $b \in \{1, \dots, S\} \setminus G$, où G représente les indices des scénarios éliminés. La distance Monge-Kantorovich minimale entre un sous-ensemble fixé $G \subset \{1, \dots, S\}$ et un ensemble de scénarios \tilde{P} avec $\{\omega_b\}_{b \notin G}$, peut être explicitement calculée, en vertu du théorème énoncé plus bas :

Théorème 4.3 (Redistribution optimale Heitsch and Römisch (2007)). Soit P une distribution discrète finie de scénarios ω_a ($a = \overline{1, S}$) et Q sa distribution probabiliste réduite de scénarios ω_b , $b \in \{1, \dots, S\} \setminus G$. La distance minimale est alors :

$$D_K(P, Q) = \sum_{a \in G} p_i \cdot \min_{b \notin G} c_T(\omega_a, \omega_b).$$

De plus, le minimum est atteint avec la probabilité q_b associée au scénario préservé ω_b appartenant à Q , $b \notin G$, et celle-ci est calculée par la formule suivante :

$$q_b = p_b + \sum_{a \in G(a)} p_a, \quad (4.18)$$

où $G(a) = \{a \in G : b = b(a)\}$ et respectivement, $b(a) \in \arg \min_{b \notin G} c(\omega_a, \omega_b)$, $\forall a \in G$.

Fréquemment dans la littérature, la formule (4.18) est reconnue en tant que la règle de la redistribution optimale. Celle-ci garantit que tous les scénarios éliminés auront une probabilité nulle et les nouvelles probabilités associées aux scénarios préservés vaudront la somme de leur probabilité initiale et toutes les probabilités correspondantes à leurs plus proches scénarios éliminés, ces derniers étant identifiés conformément à la mesure de distance utilisée c_T .

Trouver l'ensemble optimal des scénarios avec un nombre fixé de scénarios à éliminer est un problème d'optimisation combinatoire difficile. En concordance avec la définition de proximité entre distributions de probabilité et le théorème énoncé plus haut, trouver le sous-ensemble optimal réduit sous-entend la résolution d'un problème de recouvrement, qui est connu comme étant un problème \mathcal{NP} -difficile (Grove-Kuska et al., 2003). À cet égard, Beraldi and Ruszczyński (2005) et Heitsch and Römisch (2003) ont développé dans leurs recherches, des heuristiques assez efficaces basées sur des techniques de réduction des scénarios, permettant par-là de déterminer les sous-ensembles optimaux réduits. Consacrons donc le reste de la présente section à leur mise en lumière.

Soit dans les sections qui suivent, P une distribution de probabilité discrète donnée sur \mathbb{R}^n comportant les scénarios $\omega \in \Omega$, où Ω désigne l'ensemble des scénarios. Chaque scénario ω possède une probabilité associée $\mathbb{P}(\omega) > 0$ ($\omega \in \Omega$), et bien évidemment, $\sum_{\omega \in \Omega} \mathbb{P}(\omega) = 1$. De plus, dénotons par m le nombre de

scénarios à éliminer, ainsi $n = |\Omega| - m$ représentera le nombre de scénarios à préserver.

En utilisant les notations introduites ci-dessus, l'algorithme SBR (*Simultaneous Backward Reduction*) est donné dans ce qui suit immédiatement. Sa complexité temporelle est d'ordre $O(|\Omega|^2)$.

Algorithme 4.1 : Simultaneous Backward Reduction (SBR) (Heitsch and Römisch, 2003)

- pas 1** : $c_{ku} = c_T(\omega_k, \omega_u), \forall k, u = \{1, \dots, |\Omega|\}$
 $c_l^{[1]} = \min_{b \neq l} c_{lb}, \forall l, l = \{1, \dots, |\Omega|\}$
 $z_l^{[1]} = p_l c_l^{[1]}, \forall l, l = \{1, \dots, |\Omega|\}$
 $l_1 \in \arg \min_{a \in \{1, \dots, S\}} z_l^{[1]}, G^{[1]} = l_1$
- pas i** : $c_{kl} = \min_{b \notin G^{[a-1]} \cup \{l\}} c_{kb}, l \notin G^{[a-1]}, k \in G^{[a-1]} \cap \{l\}$
 $z_l^{[a]} = \sum_{k \in G^{[a-1]} \cup \{l\}} p_k c_{kl}^{[a]}, l \notin G^{[a-1]}$
 $l_a \in \arg \min_{l \notin G^{[a-1]}} z_l^{[a]}$
 $G^{[a]} = G^{[a-1]} \cup \{l_a\}$
- pas $|\Omega| - n + 1$** : fournir la redistribution optimale de n scénarios préservés
-

L'algorithme SBR débute par la recherche d'un premier scénario à éliminer, qui correspond d'ailleurs à celui qui a une distance minimale par rapport aux autres (*i.e.* le scénario qui peut être le mieux représenté par les scénarios restants). La première itération de cet algorithme consiste donc à trouver le scénario, dont l'élimination provoquera l'erreur la plus petite. Ensuite, à chaque itération suivante, la distribution de probabilité des scénarios restants est mise à jour en rajoutant la valeur de la probabilité du dernier scénario éliminé à celle de son plus proche scénario non supprimé. De cette manière, tous les m scénarios sont supprimés d'une façon itérative selon le même principe qui a été utilisé pour l'élimination du premier scénario.

Algorithme 4.2 : Fast Forward Selection (FFS) (Heitsch and Römisch, 2003)

- pas 1** : $c_{ku}^{[1]} = c_T(\omega_k, \omega_u), \forall k, u = \{1, \dots, |\Omega|\}$
 $z_u^{[1]} = \sum_{k=1, k \neq u}^S p_k c_{ku}^{[1]}, \forall u = \{1, \dots, |\Omega|\}$
 $u_1 \in \arg \min_{u \in \{1, \dots, S\}} z_u^{[1]}$
 $J^{[1]} = \{1, \dots, S\} \setminus \{u_1\}$
- pas i** : $c_{ku}^{[a]} = \min\{c_{ku}^{[a-1]}, c_{ku_{a-1}}^{[a-1]}\}, \forall k, u \in G^{[a-1]}$
 $z_u^{[a]} = \sum_{k \in G^{[a-1]} \setminus \{u\}} p_k c_{ku}^{[a]}, \forall u \in G^{[a-1]}$
 $u_a \in \arg \min_{u \in G^{[a-1]}} z_u^{[a]}$
 $G^{[a]} = G^{[a-1]} \setminus \{u_a\}$
- pas $m+1$** : fournir la redistribution optimale de n scénarios préservés
-

En utilisant la même notation introduite antérieurement, l'algorithme FFS (*Fast Forward Selection*) est illustré ci-dessus (cf. algorithme 4.2). La complexité temporelle de cet algorithme est également d'ordre $O(|\Omega|^2)$.

Le premier scénario trouvé par FFS peut être interprété en tant que le plus équidistant relativement aux autres, en conformité avec la distance entre les réalisations des scénarios c_T . Une fois le premier scénario trouvé, à chaque itération ultérieure, un nouveau scénario est choisi de telle sorte qu'en le rajoutant au sous-ensemble des scénarios sélectionnés, la réduction de la distance entre les scénarios retenus et ceux éliminés soit maximisée. L'algorithme FFS s'arrête une fois les m scénarios choisis.

D'ailleurs, l'idée directrice de ces deux algorithmes de réduction des scénarios repose sur la détermination d'une autre distribution de probabilité \tilde{P} , où $\tilde{\Omega}$ représente un sous-ensemble des scénarios ($|\tilde{\Omega}| \ll |\Omega|$), qui est la meilleure approximation de P selon une mesure de distance donnée, c_T , entre les réalisations de scénarios.

Par conséquent, la stratégie de réduction de scénarios se révèle en tant qu'une approche de résolution assez efficace du modèle stochastique donné dans la sous-section 4.2.1 et elle traité ultérieurement *via* sa reformulation mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17). Or, après une réduction de scénarios effectuée au préalable, la formulation \mathcal{P} (4.2.1) devient solvable dans le cadre de la programmation mixte en nombres entiers.

4.4 Reformulation mixte en nombres entiers et le concept de *pertinence* - $(1 - \alpha)$

Afin de résoudre le modèle sous contraintes probabilistes exposé dans les sections précédentes, nous allons introduire un nouveau concept, dénommé *pertinence* - $(1 - \alpha)$. En toute honnêteté, il convient de mentionner les notions relativement similaires existantes dans la littérature, de p -efficacité (Prékopa, 1990; Dentcheva et al., 2000, 2001) et/ou p -inefficacité (Saxena et al., 2010), mais qui ne sont pas appropriées pour aborder directement la contrainte de type (4.6). D'un côté, la p -efficacité contribue à construire des homologues déterministes pour les problèmes de genre $\{\min c^T x : Ax \geq b, \mathbb{P}\{Tx \geq \xi\} \geq 1 - \alpha, x \in \mathbb{N}\}$. D'un autre côté, la p -inefficacité quant à elle, s'applique pour la résolution des problèmes de recouvrement avec des propriétés spécifiques du second membre et des contraintes probabilistes.

Rappelons que dans le modèle stochastique élaboré dans la sous-section 4.2.1, les incertitudes apparaissent uniquement dans le membre droit des contraintes du problème et sont représentées par l'ensemble des scénarios Ω , où le scénario ω ($\omega \in \Omega$) est un vecteur J -dimensionnel de variables binaires.

Introduisons les définitions suivantes :

Définition 4.4. Soit $\omega_s = (\xi_1^s, \xi_2^s, \dots, \xi_J^s)$ et $\omega_t = (\xi_1^t, \xi_2^t, \dots, \xi_J^t)$ deux réalisations de scénarios, où $\omega_s, \omega_t \in \Omega$. Le scénario ω_s est considéré plus grand ou égal à ω_t , $\omega_s \geq \omega_t$, si $\xi_j^s \geq \xi_j^t, \forall j = \overline{1, J}$. Et, respectivement, ω_t est considéré plus petit ou égal à ω_s , $\omega_t \leq \omega_s$, si $\xi_j^s \leq \xi_j^t, \forall j = \overline{1, J}$.

Inversement, la relation d'incomparabilité entre deux scénarios ω_s et ω_t ($\omega_s \not\geq \omega_t$ et $\omega_s \not\leq \omega_t$), signifie que ω_s n'est ni plus petit, ni plus grand que ω_t .

Définition 4.5. Soit $\omega_s = (\xi_1^s, \xi_2^s, \dots, \xi_J^s)$ et $\omega_t = (\xi_1^t, \xi_2^t, \dots, \xi_J^t)$ deux réalisations de scénarios, où $\omega_s, \omega_t \in \Omega$. Le scénario ω_s est considéré incomparable avec ω_t , si ω_s n'est ni plus grand, ni plus petit que ω_t .

Il convient de noter que tous les scénarios de l'ensemble Ω ne sont pas comparables quant à leurs réalisations. À titre d'exemple, considérons deux scénarios 3-dimensionnels $(0,0,1)$ et $(1,1,0)$: ils ne sont ni plus grands, ni plus petits l'un que l'autre. Ces deux scénarios sont incomparables.

À ce point, il est également important de mentionner que si une solution partielle du programme mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17) est réalisable pour un scénario quelconque ω ($\omega \in \Omega$), elle est aussi réalisable pour tout scénario plus grand ω' , où $\omega' \geq \omega, \forall \omega' \in \Omega$. D'où il s'ensuit que le niveau de confiance garanti par le scénario ω est : $\sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \mathbb{P}(\omega')$.

Définition 4.6. Soit $\omega = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_J)$ un scénario appartenant à l'ensemble Ω . Le scénario ω est appelé $(1 - \alpha)$ -pertinent si $\sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \mathbb{P}(\omega') \geq 1 - \alpha$.

Pour plus de précisions, ajoutons que le scénario ω est considéré $(1 - \alpha)$ -pertinent si :

$$\sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \mathbb{P}(\omega') = \sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \prod_{j=1}^J \mathbb{P}(\xi_j^{\omega'}) \geq 1 - \alpha.$$

En utilisant les concepts de *pertinence* - $(1 - \alpha)$ et de *scénario incomparable*, il s'avère possible de réduire substantiellement le nombre de solutions candidates, en évitant l'élimination de celles qui sont optimales. Pour ce faire et afin de laisser plus de flexibilité dans la recherche d'un planning de récolte minimisant les risques de dégradation, il suffit de déterminer les plus grands scénarios $(1 - \alpha)$ - pertinents et incomparables, et de s'ensuire de la résolution du problème mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17) uniquement pour ceux-ci.

Algorithme 4.3 : Trouver les plus grands scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents et incomparables (SPI)

Initialisation : $\mathcal{L} = \emptyset$

$s = J$

$$t = \max_{i=1, I} \left\{ \frac{c_i}{\sum_{p=1}^P q_{ip}} \right\}$$

pas s : $\phi(\omega) = \sum_{\omega' \geq \omega} \mathbb{P}(\omega'), \forall \omega \in \Omega^s,$

si $\phi(\omega) \geq (1 - \alpha)$ **alors**

si $\omega \not\leq \tilde{\omega}, \forall \tilde{\omega} \in \mathcal{L}$ **alors**

$$\mathcal{L} = \mathcal{L} \cup \{\omega\}$$

finsi

finsi

pas t : fournir le sous-ensemble \mathcal{L} des scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents et incomparables les plus grands

Considérons l'ensemble Ω des scénarios J -dimensionnels, désignés par $\omega = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_J)$, où ξ_j est une variable aléatoire binaire, $\forall j = \overline{1, J}$. De plus, soit Ω^s ($\Omega^s \subset \Omega$) un sous-ensemble des scénarios ω , pour lesquels le nombre d'occurrence de la valeur 1 est égale à s , $s = \overline{0, J}$.

Afin de trouver le sous-ensemble des scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents et incomparables les plus grands, qui contiennent au moins t jours disponibles de récolte $\left(t = \max_{i=\overline{1, I}} \left\{ \frac{c_i}{\sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}} \right\}\right)$, noté par \mathfrak{L} , nous proposons l'algorithme 4.3, dont la complexité temporelle est d'ordre $O(|\Omega|^2)$. De toute évidence, le sous-ensemble \mathfrak{L} ($\mathfrak{L} \subset \Omega$) peut atteindre au maximum un nombre de $\binom{J}{\lceil \frac{J}{2} \rceil}$ scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents et incomparables. Sans perte de solutions faisables du modèle (4.1) - (4.17), la contrainte (4.5b) peut être remplacée par (4.5c) :

$$\sum_{\omega \in \mathfrak{L}} \lambda_\omega \geq 1 \quad (4.5c)$$

Proposition 4.7. *Considérons le programme mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17). La contrainte (4.5c) exprime correctement la contrainte (4.5b), ce qui impose que $|\Omega|$ -inégalités de type (4.5) soient satisfaites conjointement avec un niveau de confiance au moins égale à $(1 - \alpha)$.*

Démonstration. Soit x une solution faisable du problème mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17). La contrainte (4.5c) impose le fait que x soit réalisable pour au moins $(1 - \alpha)$ scénarios pertinents et incomparables ω , $\omega \in \mathfrak{L}$. Conformément à la définition de la pertinence $(1 - \alpha)$, il existe des scénarios $\omega' > \omega$, $\omega' \in \Omega$ pour lesquels x est aussi réalisable et assurent le niveau de confiance prescrit de $(1 - \alpha)$, tant et si bien que :

$$\sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \mathbb{P}(\omega') \geq 1 - \alpha.$$

Montrons maintenant que la contrainte (4.5c) exprime exhaustivement la contrainte (4.5b), sans perte d'aucune solution faisable du problème. Pour ce faire, considérons alors les triplets $\langle x^*, z^{1*}, z^{2*} \rangle$ la solution optimale du programme (4.1)-(4.17) et respectivement, $\langle \tilde{x}, \tilde{z}^1, \tilde{z}^2 \rangle$ la solution optimale du même modèle avec (4.5c) au lieu de (4.5b), pour le même niveau de confiance $(1 - \alpha)$.

Supposons par l'absurde que $f(\tilde{x}, \tilde{z}^1, \tilde{z}^2) > f(x^*, z^{1*}, z^{2*})$. Cela sous-entend qu'il existe un sous-ensemble des scénarios Ω^* ($\Omega^* \subset \Omega$) pour lequel le triplet $\langle x^*, z^{1*}, z^{2*} \rangle$ est réalisable, et de plus $\sum_{\omega \in \Omega^*} \mathbb{P}(\omega) \geq (1 - \alpha)$.

D'un autre côté, il existe un sous-ensemble des scénarios \mathfrak{L} , qui garantit le niveau de confiance prescrit de $(1 - \alpha)$, i.e. $\sum_{\omega \in \mathfrak{L}} \lambda_\omega \geq 1$. D'où il en résulte qu'il existe au moins un scénario ω ($\omega \in \mathfrak{L}$), qui assure un niveau confiance de $(1 - \alpha)$:

$$\sum_{\substack{\omega' \geq \omega \\ \omega' \in \Omega}} \mathbb{P}(\omega') \geq (1 - \alpha).$$

Considérer que $f(\tilde{x}, \tilde{z}^1, \tilde{z}^2) > f(x^*, z^{1*}, z^{2*})$ signifie qu'il existe un sous-ensemble S de Ω , ($S \subset \Omega^*$) contenant uniquement des scénarios qui sont soit incomparables ou bien plus grands que ceux du sous-ensemble \mathfrak{L} , fournissant à son tour une meilleure solution du problème pour le même niveau de confiance de $(1 - \alpha)$. Cette affirmation est fautive, en vertu de la construction du sous-ensemble \mathfrak{L} , qui comporte par définition les plus grands scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents et incomparables. Par conséquent, la supposition que $f(\tilde{x}, \tilde{z}^1, \tilde{z}^2) > f(x^*, z^{1*}, z^{2*})$ est fautive. \square

À ce stade, en remplaçant les contraintes (4.5b) par la contrainte équivalente (4.5c), nous proposons une reformulation équivalente plus forte du problème mixte en nombres entiers (4.1)-(4.17), libellée par la suite $\mathcal{P}(4.4)$:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \{r_p^a \cdot z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) - r_p^b \cdot z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip})\} \quad (4.1)$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^J x_{ipj} = 1, \quad \forall i, \forall p \quad (4.3)$$

$$\sum_{p=1}^{P_i} x_{ipj} \cdot q_{ip} \leq c_i, \quad \forall i, \forall j \quad (4.4)$$

$$(z_{ipj}^a + z_{ipj}^b) - (\xi_j^\omega - \lambda_\omega) \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j, \forall \omega \quad (4.5a)$$

$$\sum_{\omega \in \mathfrak{L}} \lambda_\omega \geq 1 \quad (4.5c)$$

$$z_{ipj}^b \cdot (j - d_{ip}) \leq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.6)$$

$$z_{ipj}^a \cdot (j - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.7)$$

$$z_{ipj}^a + z_{ipj}^b \geq x_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.8)$$

$$o_j \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.9)$$

$$M \cdot o_j \geq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipj}, \quad \forall j \quad (4.10)$$

$$M \cdot x_{ipj} \geq g_{ipj}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.11)$$

$$g_{ipj} \cdot (j - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.12)$$

$$g_{ipj} \geq g_{ip(j-1)} - \sum_{j'=1}^{j-1} x_{ipj'} + o_j - 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j > 1 \quad (4.13)$$

$$0 \leq x_{ipj} \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.14)$$

$$z_{ipj}^a, z_{ipj}^b \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall j \quad (4.16)$$

$$\lambda_\omega \in \{0, 1\}, \quad \forall \omega \quad (4.17)$$

Dans le modèle linéaire mixte en nombres entiers $\mathcal{P}(4.4)$ présenté ci-dessus, la meilleure solution qui minimise les risques de dégradation de la qualité de céréales doit être réalisable pour au moins un scénario de l'ensemble \mathfrak{L} . Ce dernier représente un sous-ensemble de l'ensemble Ω qui contient uniquement les scénarios qui garantissent le niveau de confiance désiré de $(1 - \alpha)$.

4.5 Résultats numériques

Dans ce chapitre nous avons développé un modèle stochastique en vue de maîtriser les risques de dégradation de la qualité de céréales (blé, orge, escourgeon, etc.). Celui-ci a été spécialement conçu pour contribuer à la planification efficace de l'activité de la récolte, en minimisant les risques de dégradation

de la qualité des céréales liés à la récolte prématurée ou tardive par rapport à leurs stades de maturité physiologique optimale.

Généralement, la saison de récolte s'étale approximativement sur un mois, voire un mois et demi. Or, comme nous l'avons spécifié antérieurement, le nombre des contraintes et des variables des modèles d'optimisation mixte en nombres entiers $\mathcal{P}(4.2.1)$ et $\mathcal{P}(4.4)$, augmente exponentiellement en fonction du nombre de périodes J . Même pour un horizon de temps d'un mois, le problème est insolvable par la programmation mixte en nombres entiers.

D'autre part, nous ne pouvons bénéficier de prévisions météorologiques plus ou moins plausibles et fiables que pour une période de 7-10 jours. Dans cet ordre d'idées, nous proposons de partitionner la saison de récolte en horizons de temps plus courts et de nous contenter d'une planification en étapes. Ainsi, dans le but d'obtenir des solutions de récolte autant pertinentes que possible, et puisque les prévisions météorologiques sont fournies, pour des périodes relativement courtes (environ 5-7 jours, avec un niveau de confiance acceptable), le partitionnement de l'horizon de la saison de récolte est une approche justifiée. Pour ces raisons, nous allons particulièrement nous consacrer dans le chapitre suivant à l'exploitation de cette méthodologie sur des jeux de données issues des campagnes agricoles antérieures.

Pour l'instant dans cette section, analysons les modèles et les approches discutés dans ce chapitre pour une collection des instances générées aléatoirement. Par souci de simplicité et en nous nous inspirant de l'étude de cas visé dans cette thèse, plusieurs instances ont été créées. Les caractéristiques de ces instances sont données ci-après :

- l'ensemble de chantier $I = 19$ comportant au total $\sum_{i=1}^I P_i = 293$;
- les quantités parcellaires à récolter varient entre 5 et 90 (tonnes) ;
- les capacités journalières de récolte par chantier agricole sont comprises entre 80 et 381 (tonnes).

Les variables aléatoires représentant les incertitudes météorologiques sont représentées par des distributions discrètes finies. Cinq classes de jeux de données ont été construites, correspondant aux différents coefficients de corrélation entre les variables aléatoires indépendantes. Sans perte de généralité, les indicateurs de dégradation dans le cas de récolte prématurée r_b^p , et respectivement tardive r_a^p , sont supposés égaux à 1, pour toutes les instances décrites ci-dessus.

Les algorithmes exposés tout le long de ce chapitre, ont été implémentés en utilisant le langage de programmation C++. Le problème d'optimisation avec contraintes probabilistes jointes a été résolu par l'intermédiaire des reformulations équivalentes mixtes en nombres entiers $\mathcal{P}(4.2.1)$ et $\mathcal{P}(4.4)$, à l'aide du logiciel d'optimisation ILOG CPLEX (version 12.6.1). Les expérimentations numériques ont été effectuées sur une machine Intel(R) Xeon(R) CPU W3690 à 3.47GHz.

Pour la réduction de l'ensemble de scénarios en utilisant les algorithmes d'approximation SBR et FFS présentés dans la section 4.3, nous avons considéré les paramètres suivants :

- la norme euclidienne pour mesurer la distance entre deux scénarios finis $\omega_s = (\xi_1^s, \dots, \xi_J^s)$ et $\omega_t = (\xi_1^t, \dots, \xi_J^t)$, c'est à dire :

$$c_T(\omega_s, \omega_t) = \|\xi_i^s - \xi_i^t\|_2 = \sqrt{(\xi_1^s - \xi_1^t)^2 + \dots + (\xi_J^s - \xi_J^t)^2},$$

où $\omega_s, \omega_t \in \Omega$.

- le nombre de scénarios à éliminer par les algorithmes SBR et FFS est empiriquement imposé de telle manière que le $\mathcal{P}(4.2.1)$ soit solvable par ILOG CPLEX pour les jeux de données considérées.

Comparons d'abord les deux techniques de réduction de scénarios SBR et FFS. Ainsi, la figure 4.1 illustre les résultats numériques obtenus pour un horizon de temps de 10 jours (*i.e.* $|\Omega| = 2^{10} = 1024$ scénarios du problème) en termes du temps nécessaire de calcul. Pour différentes dimensions du sous-ensemble des scénarios préservés, il apparaît que l'algorithme SBR est plus gourmand en temps de calcul que l'algorithme FFS. Ce constat se vérifie toujours lorsque le nombre de scénarios éliminés est plus grand que celui des scénarios conservés. Au contraire, en comparaison avec FFS, SBR fournit des solutions plus efficaces et plus fiables en même temps pour les jeux de données testés (*cf.* tableau 4.2). Ceci se traduit par de plus petites valeurs de la fonction-objectif obtenues conjointement avec un niveau de confiance $(1 - \alpha)_{\max}$ plus élevé. Il est à noter que $(1 - \alpha)_{\max}$ représente le niveau de confiance maximum auquel il est possible de trouver une solution faisable pour le sous-ensemble de scénarios préservés.

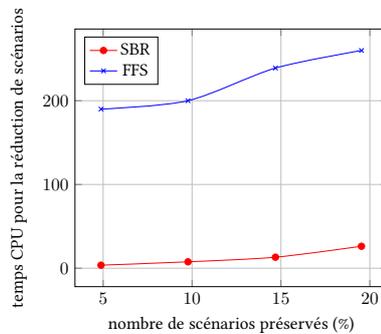


FIGURE 4.1 – Résultats relatifs à $\mathcal{P}(4.2.1)$ pour un horizon de temps de 10 jours : *temps de calcul*

Maintenant, examinons les résultats des expérimentations numériques montrées dans les tableaux présentés ci-après. Les résultats ont été comparés au regard du temps de calcul, la valeur de la fonction-objectif et le niveau de confiance $(1 - \alpha)_{\max}$, obtenus pour différentes valeurs de la variance des variables aléatoires indépendantes $\sigma_{\xi_j}^2, \forall j = \overline{1, J}$ (puisque les variables aléatoires sont binaires, $\sigma_{\xi_j}^2 \in (0, 0.25]$).

Le tableau 4.2 offre des détails sur la performance des deux contreparties linéaires mixtes en nombres entiers $\mathcal{P}(4.4)$ et $\mathcal{P}(4.2.1)$, nous permettant d'aborder le modèle stochastique vu dans la section 4.2. Les résultats numériques témoignent de l'efficacité et de l'efficience de la reformulation $\mathcal{P}(4.4)$ par rapport à $\mathcal{P}(4.2.1)$, cette dernière étant résolue conjointement avec les approches de réduction de scénarios SBR, et respectivement FFS. Il convient également de préciser que le nombre de scénarios conservés a été limité à 19.53% (200 scénarios) à cause de manque de mémoire nécessaire pour la résolution d'un programme mixte en nombres entiers avec ILOG CPLEX.

D'autres expérimentations ont été également réalisées afin d'évaluer la performance du problème mixte en nombres entiers pour un horizon de temps plus important de 13 jours (*i.e.* $|\Omega| = 2^{13} = 8192$ scénarios du problème). En nous référant aux algorithmes approchés de réduction de scénarios FFS et SBR, ceux-ci nécessitent un temps de calcul beaucoup plus important pour la réduction de 200 scénarios (ce qui ne représente que 2,44 % de l'ensemble de scénarios correspondant à un horizon de temps de 13 jours). De plus, il convient de noter que pour un horizon de temps de 13 jours, ILOG CPLEX ne résout le problème même pas pour 2,44 % de l'ensemble de scénarios du fait d'un manque de mémoire.

Tableau 4.2 – Tests effectués pour une période de récolte de 10 jours

$\min_{j=1, \dots, J} \sigma_{\xi_j}^2$	Caractéristique	$\mathcal{P}(4.4)/\text{SPI}$	$\mathcal{P}(4.2.1)/\text{SBR}$	$\mathcal{P}(4.2.1)/\text{FFS}$	
0,25	valeur de la fonction-objectif	65	2	-	
	$(1 - \alpha)_{\max}$	[0,007 ; 0,008)	[4e-04 ; 0,001)	< 1e-005	
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	0,06	219,62	-
		programme mixte en nombres entiers	132,43	1,15	-
		total	132,49	220,77	-
0,20	valeur de la fonction-objectif	34	7	2	
	$(1 - \alpha)_{\max}$	[0,05 ; 0,10)	[0,04 ; 0,005)	[0,03 ; 0,05)	
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	0,06	225,94	13,27
		programme mixte en nombres entiers	16,99	35,83	1,15
		total	17,05	261,77	24,42
0,15	valeur de la fonction-objectif	100	36	36	
	$(1 - \alpha)_{\max}$	[0,25 ; 0,30)	[0,15 ; 0,20)	[0,15 ; 0,20)	
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	0,04	225,60	13,14
		programme mixte en nombres entiers	67,40	22,17	18,35
		total	67,44	247,77	31,49
0,10	valeur de la fonction-objectif	100	36	36	
	$(1 - \alpha)_{\max}$	[0,45 ; 0,50)	[0,35 ; 0,40)	[0,25 ; 0,30)	
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	0,11	224,60	13,94
		programme mixte en nombres entiers	67,17	3,95	3,91
		total	67,28	228,55	27,85
0,05	valeur de la fonction-objectif	96	128	128	
	$(1 - \alpha)_{\max}$	[0,70 ; 0,75)	[0,75 ; 0,80)	[0,75 ; 0,80)	
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	0,11	222,59	13,38
		programme mixte en nombres entiers	54,09	127,41	131,705
		total	54,20	350,00	245,08

En outre, les résultats représentés dans les tableaux 4.2 et 4.3 mettent en relief la relation entre la variance des variables aléatoires et le niveau de confiance : plus la variance tend vers zéro, plus le niveau de confiance de la solution tend respectivement vers 1. Autrement dit, plus la variance est faible plus le niveau de confiance est élevé. Le niveau de confiance est donc reflété et dépend inéluctablement de la corrélation entre les variables aléatoires.

De plus, comme le montre les expérimentations numériques conduites, la reformulation $\mathcal{P}(4.4)$ présente des résultats compétitifs en ce qui concerne les temps de calcul, valeurs de la fonction-objectif et niveau de confiance des solutions proposées. Par souci d'impartialité, il convient néanmoins de souligner que le programme $\mathcal{P}(4.4)$ est également difficile à résoudre pour un grand nombre de scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents, qui peut d'ailleurs s'élever jusqu'à $\binom{J}{\lceil \frac{J}{2} \rceil}$ scénarios dans le pire des cas.

En revanche, vu que dans les applications réelles, seules les solutions optimales les plus fiables sont retenues (*i.e.* de degré de confiance élevé), le programme $\mathcal{P}(4.4)$ représente une reformulation forte et compétitive. C'est surtout vrai, compte tenu du fait qu'un niveau de confiance satisfaisant ne peut être requis que pour des périodes de récolte relativement courtes, *i.e.* en adéquation avec la fiabilité de la connaissance probabiliste relative aux incertitudes météorologiques.

Tableau 4.3 – Tests effectués pour une période de récolte de 13 jours

$\min_{j=1,\overline{J}} \sigma_{\xi_j}^2$	Caractéristique		$\mathcal{P}(4.4)/\text{SPI}$	$\mathcal{P}(4.2.1)/\text{SBR}$	$\mathcal{P}(4.2.1)/\text{FFS}$
0,25	valeur de la fonction-objectif		2	-	-
	$(1 - \alpha)_{\max}$		[0,0009 ; 0,001)	-	-
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	5,50	-	-
		programme mixte en nombres entiers	13,29	-	-
		total	18,79	-	-
0,20	valeur de la fonction-objectif		2	-	-
	$(1 - \alpha)_{\max}$		[0,002 ; 0,005)	-	-
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	5,39	-	-
		programme mixte en nombres entiers	3,25	-	-
		total	8,64	-	-
0,15	valeur de la fonction-objectif		100	-	-
	$(1 - \alpha)_{\max}$		[0,25 ; 0,30)	-	-
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	132,14	-	-
		programme mixte en nombres entiers	57,64	-	-
		total	138,21	-	-
0,10	valeur de la fonction-objectif		69	-	-
	$(1 - \alpha)_{\max}$		[0,40 ; 0,45)	-	-
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	173,40	-	-
		programme mixte en nombres entiers	164,13	-	-
		total	237,53	-	-
0,05	valeur de la fonction-objectif		37	-	-
	$(1 - \alpha)_{\max}$		[0,65 ; 0,70)	-	-
	temps CPU	algorithme de réduction des scénarios	5,89	-	-
		programme mixte en nombres entiers	3,92	-	-
		total	8,81	-	-

4.6 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons abordé le cas statique et générique du problème de gestion des risques de dégradation de la qualité de céréales, tout en tenant compte des aléas météorologiques et en autorisant les deux cas de récolte, prématurée et tardive. En ce sens, un modèle sous contraintes probabilistes jointes a été proposé et résolu *via* des contreparties linéaires équivalentes, *ad hoc* élaborées. Pour pallier la malédiction de la dimensionnalité qui résulte de la taille de l'ensemble des scénarios du problème, et qui augmente exponentiellement avec la longueur de l'horizon de temps, deux techniques de réduction de scénarios ont été appliquées.

Dans un premier temps, nous avons fait recours à l'approche la plus souvent utilisée dans la littérature : la réduction de scénarios. Cette dernière est basée sur la notion de distances entre distributions de probabilités, étant en règle générale réalisée *via* deux algorithmes, à savoir *Simultaneous Backward Reduction*, et respectivement, *Fast Forward Reduction*. Dans un deuxième temps, nous avons introduit un nouveau concept, appelé *pertinence* $(1 - \alpha)$, permettant d'exploiter uniquement les scénarios les plus grands qui garantissent le niveau de confiance désiré de $(1 - \alpha)$.

Cependant, le problème sous étude dans ce chapitre ne peut être résolu à l'optimalité pour un horizon

de temps de plus de 15 jours, qu'avec un niveau de confiance très faible (proche de 0 pour des variances des variables aléatoires indépendantes plus grandes que 0,1). Pour surmonter cet inconvénient, dans le chapitre suivant une modélisation plus réaliste du problème sera donc présentée, en considérant à la fois les deux dimensions stochastique et dynamique de la conjoncture décisionnelle dans laquelle se déroule la récolte de céréales. Basée sur le principe de partitionnement de l'horizon de récolte, une approche en plusieurs étapes sera proposée et analysée dans la suite de ce document.

Gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales : *cas dynamique*

“ Chaque client a besoin de développer des niches valorisantes pour son activité et chaque culture peut être concernée par des débouchés très spécifiques...”

Bernard IWEINS, Responsable Commercial Céréales, SCARA

”

Sommaire

5.1 Introduction	65
5.2 Description du problème et modélisation mathématique	66
5.3 Une approche dynamique pro-active	71
5.4 Résultats numériques	74
5.5 Conclusions et perspectives	78

5.1 Introduction

Comme nous l’avons mentionné dans le chapitre précédent, la collecte de céréales représente une étape cruciale à la fois pour les coopératives agricoles ainsi que pour les agriculteurs. Pendant la récolte, les dommages causés par les précipitations sont particulièrement considérables pour les cultures de blé. La germination des grains dans des conditions de récolte humides implique des niveaux élevés d’alpha-amylase qui entraînent des effets préjudiciables à la qualité de production finale, et par conséquent, aux rendements économiques du blé (Eeden and Labuschagne, 2012). Ainsi, dans ce chapitre nous allons nous focaliser plus particulièrement sur la planification de la récolte du blé en minimisant les risques de dégradation au regard d’indice de chute de Hagberg (métrique standardisée et internationalement reconnue, utilisée pour estimer la qualité des blés).

Au meilleur de nos connaissances et tel que constaté dans le chapitre 2, nous assistons actuellement à une insuffisance des outils et/ou des méthodologies de planification opérationnels capables de gérer d’une

manière convenable les aspects incertains, particulièrement dans le secteur de l'agriculture. Au même titre, les méthodes traditionnelles dédiées à la résolution des problèmes d'optimisation déterministes ne sont pas appropriées pour capturer à la fois les deux dimensions, dynamique et stochastique, inhérentes à la plupart des applications industrielles.

Toutefois, deux paradigmes, puissants et concurrentiels, sont bien connus pour gérer les processus de prise de décisions à la fois incertains et dynamiques : la programmation stochastique multi-étapes (Kall and Wallace, 1994; Shapiro et al., 2009; Dantzig and Infanger, 1993) et la programmation stochastique dynamique (Zhang et al., 2014; Birge, 1985; Puterman, 1994; Fourer and Lopes, 2006). Ces deux familles de programmations stochastiques sont souvent confondues dans la littérature. Étant donné le fait que les étapes ne sont que des points fixés dans le temps, les systèmes inspectés à un nombre fini d'étapes sont ainsi considérés comme dynamiques.

Tel que le signalent Dupacová and Sladký (2002), la programmation stochastique multi-étapes (aussi appelée programmation stochastique à plusieurs pas de temps) et la programmation stochastique dynamique s'adressent à la même catégorie de problèmes, *i.e.* à ceux qui impliquent un processus de prises de décisions dynamique et stochastique. Les principales distinctions entre ces deux paradigmes résident dans la définition du concept de décision, dans la structure et la manière de modélisation ainsi que dans les procédures de résolution. D'un point de vue pratique, même si l'utilisation de la programmation stochastique multi-étapes et de la programmation stochastique dynamique montre un intérêt croissant, peu de mises en œuvre dans des applications industrielles ont été développées jusqu'à présent, notamment dans le secteur de l'agriculture (*cf.* chapitre 2).

En vue de surmonter certains inconvénients énoncés ci-dessus, le problème de contrôle de la qualité du blé pendant l'activité de moisson sera minutieusement traité dans ce chapitre. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des principes de résolution de la programmation stochastique multi-étapes et de la programmation stochastique dynamique. Dans la section suivante un modèle multi-étapes à horizon glissant est donc présenté. En profitant de plusieurs propriétés du modèle conçu, une méthodologie dynamique pro-active est exposée dans la section 5.3. Afin de vérifier l'efficacité de la méthodologie proposée, dans la section 5.4 de nombreuses expérimentations numériques sont données et discutées. Ce chapitre se termine avec la section 5.5, en évoquant les principales conclusions et perspectives qui peuvent en être dégagées.

5.2 Description du problème et modélisation mathématique

Des conditions météorologiques défavorables pendant la période de moisson engendrent la germination des grains et le développement d'enzymes, plus précisément il est question des alpha-amylases. En ce sens, l'indice ou le temps de chute de Hagberg détermine indirectement l'activité alpha-amylasique, qui se déclenche dans les grains dès le début du processus de germination et peut devenir excessive dans le cas de présence de grains germés ou en voie de germination. Une activité excessive des alpha-amylases, ce qui correspond à de faibles indices de chute de Hagberg, conduit à l'obtention de pâtes très molles, collantes, ne permettant pas d'être travaillées convenablement. De plus, les produits cuits présentent des colorations brunes très prononcées d'une texture insuffisante (Perten, 1964; Hagberg, 1960; Edwards et al., 1989). Donc, un blé dont l'activité alpha-amylasique est trop importante, ne convient pas aux industries de cuisson des céréales (*e.g.* boulangerie, viennoiserie, biscotterie, biscuiterie, etc.) et doit être orienté vers

l'alimentation du bétail, *i.e.* déclassé au rang de blé fourrager.

Un indice de chute de Hagberg n'est pas une fonction additive. La relation curviligne entre l'indice de chute de Hagberg χ et l'activité alpha-amylasique peut être exprimée au moyen de la formule empirique suivante, en convertissant l'indice de chute de Hagberg χ en nombre de liquéfaction η (Perten, 1964) :

$$\eta = \frac{6000}{\chi - 50} \quad (5.1)$$

Afin de déterminer le nombre de liquéfaction $\eta_{l_1+l_2}$ d'un mélange de deux lots l_1 et l_2 , ayant les nombres de liquéfaction associés η_{l_1} et respectivement η_{l_2} , ITCF (2001) donne la formule suivante :

$$\eta_{l_1+l_2} = \frac{l_1 \cdot \eta_{l_1} + l_2 \cdot \eta_{l_2}}{l_1 + l_2} \quad (5.2)$$

Maintenant, généralisons la formule (5.2) en vue de déterminer le nombre de liquéfaction d'un mélange constitué de L lots différents de blé l_n , ayant chacun son nombre de liquéfaction donné par η_{l_n} , $n = \overline{1, L}$:

$$\eta_{\sum_{n=1}^L l_n} = \frac{\sum_{n=1}^L l_n \cdot \eta_{l_n}}{\sum_{n=1}^L l_n} \quad (5.3)$$

Afin de traiter le problème de planification de récolte du blé de façon à réduire la dégradation de sa qualité, reconsidérons le modèle stochastique sous contraintes probabilistes jointes présenté dans le chapitre précédent (*cf.* section 4.2.1). Comme nous l'avons suggéré dans la section 4.6, partitionnons l'horizon de temps en plusieurs étapes s constituées chacune de T_s périodes de temps et considérées, sans perte de généralité, équivalentes, *i.e.* $T = T_1 = T_2 \dots$. Dénotons par S l'ensemble d'étapes s qui représente, au fait, une partition de l'horizon de récolte J , *i.e.* $J = T \cdot |S|$.

Ainsi, reprenons les notations et le modèle stochastique présentés dans le chapitre précédent (*cf.* section 4.2.1), en associant l'indice s correspondant à chaque étape de temps aux variables de décisions, *i.e.* x_{ipt}^s , g_{ipt}^s et o_t^s ($s = \overline{1, S}$, $t = \overline{1, T}$, $i = \overline{1, I}$, $p = \overline{1, P}$). Au lieu de considérer les indices de dégradation génériques r_a^p et r_b^p ($p = \overline{1, P}$), désignons par y_{ip} le nombre de liquéfaction du mélange de blé récolté, qui provient de la parcelle p appartenant au chantier agricole i ($i = \overline{1, I}$). Soit η_{ipt}^s le nombre de liquéfaction correspondant à la quantité récoltée de la parcelle p par le chantier agricole i le jour t à l'étape s . De plus, la récolte du blé est interdite avant la date de maturité physiologique, restriction imposée par la contrainte (5.13).

Dans le but de minimiser le nombre de liquéfaction du mélange de la totalité du blé récolté, remplaçons alors la fonction-objectif (4.1) par celle qui est définie dans l'expression (5.5). Pour déterminer l'indice de chute de Hagberg associé, il suffit d'appliquer la formule (5.1).

En vue de mieux appréhender l'évolution de l'activité de récolte, les incertitudes exogènes (*i.e.* qui sont incontrôlables et ne dépendent pas ni des variables de décision ni de leurs réalisations) $\xi_1^1, \dots, \xi_T^1, \xi_1^2, \dots,$

$\xi_T^2, \dots, \xi_1^S, \dots, \xi_T^S$ sont considérées révélatrices au fil des étapes s et les décisions adaptables à ce processus. La séquence $\xi_t^s \in \{0, 1\}$ ($t = \overline{1, T}$) relative à l'étape s , est interprétée en tant qu'un processus stochastique, *i.e.* une séquence des variables aléatoires qui suivent des lois de probabilité spécifiées. Dénotons par $\xi^{[s]} = (\xi^1, \dots, \xi^s)$ l'historique du processus stochastique jusqu'à l'étape s , où $\xi^s = (\xi_1^s, \dots, \xi_T^s)$.

La solution choisie à l'étape s dépendra : **(i)** des réalisations météorologiques passées $\xi^{[s-1]}$ et de futures prévisions ξ^s , **(ii)** des résultats de l'implémentation *de facto* de la solution trouvée dans un environnement stochastique et dynamique à l'étape antérieure. En d'autres termes, la fameuse propriété de non-anticipativité, méticuleusement examinée dans les études relatives à la programmation stochastique multi-étapes (Flåm, 1985; Rockafellar and Wets, 1976), n'est pas valable pour le problème de planification de récolte du blé mis au point dans ce chapitre.

À la lumière de ce qui précède, établissons l'ordre des événements dans la prise de décisions de la manière suivante : au début de la première étape, les décisions sont prises face au vecteur ξ^1 (les incertitudes météorologiques n'étant pas encore connues) et exprimées par $x_{ipt}^1 = (x_{ipt1}^1, \dots, x_{iptT}^1)$; ensuite, une fois la météo survenue, ceci est considérée observée dans $\xi^{[1]}$ et l'implémentation *de facto* du vecteur de décisions x_{ipt}^1 est désignée par $x_{ipt}^{[1]}$. En se basant sur les résultats observés, les décisions à la deuxième étape $x_{ipt}^2(x_{ipt}^{[1]}, \xi^2)$ sont prises, tout en tenant compte : **(i)** des observations climatiques passées $\xi^{[1]}$, **(ii)** de la réalisation des décisions $x_{ipt}^{[1]}$, et **(iii)** des prévisions météorologiques ξ^2 ; etc. En récapitulant, formalisons le processus de prise des décisions tel qu'indiqué par la trajectoire des événements (5.4) illustrée ci-après.

$$\begin{aligned} & \text{décision}(x^1, \xi^1) \rightsquigarrow \text{réalisation}(x^{[1]}, \xi^{[1]}) \rightsquigarrow \text{décision}(x^2, \xi^2) \rightsquigarrow \\ & \dots \rightsquigarrow \text{réalisation}(x^{[s-1]}, \xi^{[s-1]}) \rightsquigarrow \text{décision}(x^s, \xi^s) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Puisque les autres variables de décisions g_{ipt}^s ne sont pas explicitement influencées par les aléas météorologiques, il n'est pas nécessaire de les ajuster conformément à la météo révélée lors de l'étape précédente. Il suffit de prendre en considération uniquement la réalisation *de facto* de la solution proposée à l'étape $(s-1)$: $g_{ipt}^s = g_{ipt}^s(g_{ipt}^{[s-1]})$. Alors que les variables o_t^s ne dépendent de façon explicite ni de la réalisation de la solution proposée lors de l'étape précédente ni des conditions météorologiques survenues. Un aperçu d'un tel processus de prise de décisions est représenté dans la Fig. 5.1.

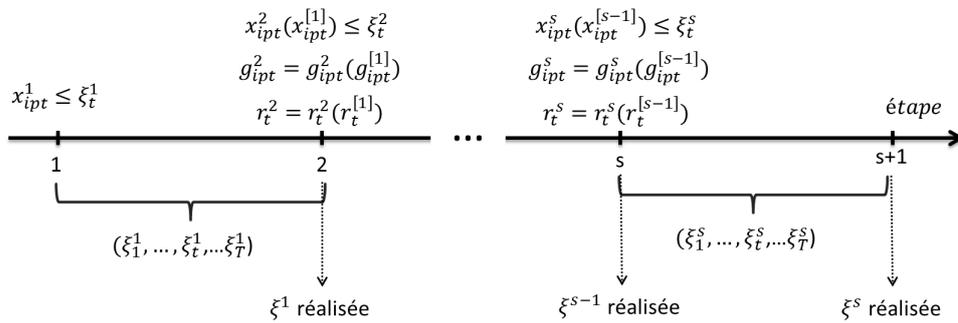


FIGURE 5.1 – Un aperçu du processus de prise de décisions multi-étapes à horizon glissant

Pour des raisons de clarté et afin d'éviter toute confusion avec la programmation stochastique multi-étapes dans son sens classique, appelons le programme qui suit le processus de prise de décisions introduit juste

avant (cf. Fig. 5.1), programme stochastique multi-étapes à horizon glissant. De cette façon, une contrepartie stochastique multi-étapes à horizon glissant dans le cas de récolte du blé correspondant au modèle statique présenté dans le chapitre précédent (libellée $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$), peut être formalisée comme indiqué ci-dessous :

$$\min f = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} y_{ip} \cdot \frac{q_{ip}}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}} \quad (5.5)$$

sous contraintes :

$$\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s = 1, \quad \forall i, \forall p \quad (5.6)$$

$$\sum_{p=1}^{P_i} x_{ipt}^s \cdot q_{ip} \leq c_i, \quad \forall i, \forall s, \forall t \quad (5.7)$$

$$\mathbb{P}(x_{ipt}^s \leq \xi_t^s, \forall i, \forall p, \forall t, \forall s) \geq 1 - \alpha \quad (5.8)$$

$$x_{ipt}^s \leq g_{ipt}^s, \quad \forall i, \forall p, \forall s, \forall t \quad (5.9)$$

$$M \cdot x_{ipt}^s \geq g_{ipt}^s, \quad \forall i, \forall p, \forall s, \forall t \quad (5.10)$$

$$o_t^s \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipt}^s, \quad \forall s, \forall t \quad (5.11)$$

$$M \cdot o_t^s \geq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipt}^s, \quad \forall s, \forall t \quad (5.12)$$

$$g_{ipt}^s \cdot ((s-1) \cdot T + t - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall s, \forall t \quad (5.13)$$

$$g_{ipt}^1 \geq g_{ip(t-1)}^1 - \sum_{t'=1}^{t-1} x_{ipt'}^1 + o_t^1 - 1, \quad \forall i, \forall p, \forall t > 1 \quad (5.14)$$

$$g_{ipt}^s \geq g_{ip(t-1)}^s - \sum_{s'=1}^{s-1} \sum_{t'=1}^{t-1} x_{ipt'}^{s'} + o_t^s - 1, \quad \forall i, \forall s > 1, \forall p, \forall t > 1 \quad (5.15)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s = y_{ip}, \quad \forall i, \forall p \quad (5.16)$$

$$x_{ipt}^s = x_{ipt}^s(x_{ipt}^{[s-1]}), \quad \forall i, \forall p, \forall s > 1, \forall t \quad (5.17)$$

$$g_{ipt}^s = g_{ipt}^s(g_{ipt}^{[s-1]}), \quad \forall i, \forall p, \forall s > 1, \forall t \quad (5.18)$$

$$0 \leq x_{ipt}^s \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall s, \forall t \quad (5.19)$$

$$y_{ip} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall p \quad (5.20)$$

$$o_t^s, g_{ipt}^s \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall s, \forall t \quad (5.21)$$

Énumérons quelques propriétés de la reformulation $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$:

- les disponibilités des jours de récolte $\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^s, \dots$, sont mutuellement indépendantes, $\forall s$. Dans le cadre de la programmation stochastique multi-étapes, cette propriété est appelée *indépendance entre les étapes* (Dupacová and Sladký, 2002).

- la fonction-objectif (5.5) est séparable par rapport aux indices désignant les étapes s . En particulier, elle est additive conformément à (5.23).
- *sous-optimalité* : (i) le processus de dégradation du blé est irréversible. Il est déclenché par les pluies survenantes entre la maturité physiologique des grains et le jour de récolte, *i.e.* :

$$\eta_{ip1}^1 \leq \dots \leq \eta_{ipT}^1 \leq \eta_{ip1}^2 \leq \dots \leq \eta_{ipT}^2 \leq \dots \quad (5.22)$$

(ii) les décisions de récolte prises à toute étape s ne dépendent pas de futures réalisations des aléas météorologiques aux étapes suivantes, car :

1. la récolte doit être finie le plus tôt possible dans le but de prévenir la dégradation de la qualité du blé, fait exprimé par la fonction-objectif (5.5) ;
2. la récolte prématurée est interdite (5.13).

Ainsi, en vertu des remarques ci-mentionnées (i)-(ii) et de l'expression (5.23), la structure sous-jacente du $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$ est facilement discernable.

- les contraintes jointes (5.16) peuvent être directement exprimées dans la fonction-objectif en remplaçant $y_{ip} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s$, comme indiqué par (5.23).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} y_{ip} \cdot \frac{q_{ip}}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}} = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \left(\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s \cdot \frac{q_{ip}}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}} \right) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s \cdot \frac{q_{ip}}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}} \quad (5.23)$$

$$f = \underbrace{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} y_{ip} \cdot \frac{q_{ip}}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}}}_{(5.24)a} + N \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \left(1 - \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \right)}_{(5.24)b} \quad (5.24)$$

Ré-définissons maintenant la formulation stochastique du problème $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$ en effectuant les modifications suivantes : minimiser la fonction-objectif (5.24) ; éliminer les contraintes (5.16) et les exprimer directement dans la fonction-objectif tel que montrées par (5.23) ; relâcher les contraintes liantes (5.6), *i.e.* substituer le signe (=) par plus petit ou égal (\leq) ; et, les rajouter dans la fonction-objectif comme indiqué par (5.24)*b*, tout en gardant les autres contraintes (5.7)-(5.21) inchangées. Dénotons par $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$ le nouveau programme stochastique multi-étapes à horizon glissant ainsi construit.

Proposition 5.1. *Soit $\langle x^*, y^*, r^*, g^* \rangle$ une solution optimale du programme $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$, alors la solution $\langle x^*, y^*, r^*, g^* \rangle$ est aussi optimale pour le programme $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$.*

Démonstration. Tout d'abord, en tenant compte de l'expression (5.22), pour des valeurs de N suffisamment larges (*e.g.* $N \geq \max\{\eta_{ipt}^s : \forall i, \forall p, \forall t, \forall s\}$), il est manifeste qu'en minimisant (5.24)*b*, l'expression (5.24)*a* est également minimisée. Par ailleurs, dans le cas où (5.24)*b* atteint la valeur nulle (*i.e.* les contraintes (5.6) sont respectées), les $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$ et $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$ deviennent équivalentes.

Si $\langle x^*, y^*, r^*, g^* \rangle$ est une solution optimale pour $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$, alors les contraintes (5.6) sont vérifiées et par conséquent, (5.24)b est nulle. D'où, $\langle x^*, y^*, r^*, g^* \rangle$ est aussi optimale pour $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$. \square

Bien évidemment, tout problème faisable $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$ est équivalent à $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$. Puisque les programmes stochastiques multi-étapes à horizon glissant ont été développés partant d'un problème rencontré dans une étude de cas industriel où chaque récolte doit être entièrement achevée, considérons un nombre suffisamment large d'étapes S pour rendre le problème $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^I$ faisable. Ainsi dans ce qui suit, c'est la reformulation $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$ qui sera particulièrement examinée.

En considérant la nature exogène des incertitudes météorologiques et en s'appuyant sur la structure sous-jacente du problème, nous proposons une approche dynamique pro-active dans la section suivante. Cette approche se relève être suffisamment appropriée pour capturer les spécificités du problème étudié et pour résoudre la reformulation stochastique $\mathcal{P}_{S\text{-étapes}}^{II}$.

5.3 Une approche dynamique pro-active

Traditionnellement, les problèmes d'optimisation stochastiques sont répertoriés en deux classes selon la nature des incertitudes qui affectent la prise de décision à savoir, exogènes et endogènes. [Mercier and Van Hentenryck \(2008\)](#) ont affiné cette classification en problèmes exogènes pures, endogènes pures et Stoxuno (*stochastic optimization with exogenous uncertainty and endogenous observations*, en anglais).

En adéquation avec cette classification, le problème de planification de récolte du blé est purement exogène, lorsque les incertitudes sont exprimées par des distributions de probabilité, dont les réalisations surviennent indépendamment des décisions prises aux différents étapes. Un tel processus de décision est dénommé *processus de décision exogène de Markov* ([Mercier and Van Hentenryck, 2008](#)).

Afin de mieux comprendre le problème de planification de récolte du blé, caractérisons le dynamisme du système de récolte en tant qu'un processus de décision exogène de Markov (cf. Fig. 5.1), qui est défini par les éléments suivants :

- \square **les étapes** : l'horizon de récolte est *glissant en temps vers l'avant*, étant représenté par un ensemble d'étapes s ($s = 1, 2, \dots$).
- \square **l'état du système** : plutôt que d'en fixer l'horizon de récolte à J périodes de temps (ou le nombre d'étapes à S), introduisons la notion d'*état de système de récolte* à l'étape s désigné par Δ^s pour représenter la quantité totale résiduelle q_{ip}^s à collecter de toutes les parcelles P_i ($i = \overline{1, I}$), où :

$$q_{ip}^1 = q_{ip}, \quad \forall i, \forall p \quad (5.25)$$

$$\Delta^1 = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}^1, \quad (5.26)$$

$$\Delta^s = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}^s, \quad \forall s \quad (5.27)$$

- \square **la fonction de coût immédiat à l'étape s** : dénotons par f^s la fonction-objectif correspondante à l'étape s . Grâce à l'expression (5.23) et en considérant la fonction-objectif telle qu'elle est utilisée

dans $\mathcal{P}_{\text{S-étapes}}^{\text{II}}$, les relations récurrentes entre étapes sont définies en (5.28) et (5.29). Ainsi, la fonction de coût immédiat à l'étape s , donnée par R^s , peut être exprimée comme indiqué dans l'expression (5.29), si le système est dans l'état Δ^s à l'étape s et la décision tri-dimensionnelle $\langle x, r, g \rangle$ est prise.

$$f^1 = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^1 \cdot \eta_{ipt}^1 \cdot \frac{q_{ip}^1}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}^1} - N \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^1 \quad (5.28)$$

$$f^s = f^{s-1} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s \cdot \frac{q_{ip}^s}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}^s} - N \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s, \quad \forall s > 1 \quad (5.29)$$

□ **fonctions de transition (déterministes)** : la transformation (ou la transition) du système de récolte de l'état Δ^{s-1} dans l'état Δ^s est modélisée par les formules données ci-après (5.30) et (5.31), pour chaque $\forall i, \forall p, \forall t, \forall s > 1$:

$$x_{ipt}^s = x_{ipt}^s(x_{ipt}^{[s-1]}) : q_{ip}^s = q_{ip}^{s-1} - \sum_{p=1}^{P_i} x_{ipt}^{[s-1]} \cdot q_{ip}^{s-1} \quad (5.30)$$

$$g_{ipt}^s = g_{ipt}^s(g_{ipt}^{[s-1]}) : g_{ip1}^s \geq g_{ipT}^{s-1} - \sum_{s'=1}^{s-1} \sum_{t'=1}^T x_{ipt'}^{s'} + o_t^s - 1 \quad (5.31)$$

□ **décision (action) prise à l'étape s** : soit Ω^s l'ensemble de scénarios de disponibilité de récolte correspondant à l'étape s , où $\omega_s = (\xi_1^{\omega_s}, \dots, \xi_T^{\omega_s})$ et leurs probabilités discrètes associées : $\mathbb{P}(\omega_s) = \prod_{t=1}^T \mathbb{P}(\xi_t^{\omega_s})$, $\forall \omega_s \in \Omega^s$. De plus, dénotons par $\tilde{\Omega}^s$ l'ensemble de scénarios $(1 - \alpha)$ -pertinents. Par souci de clarté, rappelons qu'un scénario est dénommé $(1 - \alpha)$ -pertinent, s'il garantit un niveau de confiance au moins égal à $(1 - \alpha)$ (cf. section 4.4).

Pour contourner la non-linéarité de la contrainte probabiliste (5.8) et en vertu des contributions théoriques obtenues dans le cadre de la programmation sous contraintes probabilistes (Shapiro et al., 2009; Kall and Wallace, 1994), introduisons les variables $\lambda_{\tilde{\omega}_s}^s$, associées à chaque scénario $(1 - \alpha)$ -pertinent et incomparable $\tilde{\omega}_s$ de l'étape s ($\tilde{\omega}_s \in \tilde{\Omega}^s$). Ces variables $\lambda_{\tilde{\omega}_s}^s$ sont définies à prendre la valeur 1, si pour le scénario $(1 - \alpha)$ -pertinent $\tilde{\omega}_s$, la contrainte probabiliste (5.8) est satisfaite $\forall i, \forall p, \forall t$; et la valeur 0, sinon. De cette façon, la contrainte probabiliste (5.8) peut être réécrite par les contraintes déterministes suivantes (5.8a) et (5.8b) :

$$o_t^s - (\xi_t^{\tilde{\omega}_s} - \lambda_{\tilde{\omega}_s}^s) \leq 1, \quad \forall t, \forall \tilde{\omega}_s, \forall s \quad (5.8a)$$

$$\sum_{\tilde{\omega}_s \in \tilde{\Omega}^s} \lambda_{\tilde{\omega}_s}^s \geq 1, \quad (5.8b)$$

L'exactitude d'une telle transformation ainsi que l'équivalence entre les contraintes (5.8) et (5.8a)-(5.8b) ont été antérieurement expliquées et prouvées dans le chapitre précédent (cf. sous-section 4.2.1).

Partant des remarques et des observations faites ci-dessus, une reformulation équivalente déterministe mixte $\mathcal{P}_{s\text{-step}}^{\text{MIP}}$, pour le problème de planification de récolte du blé à étape s , peut être alors modélisée par la fonction-objectif (5.29) sous les contraintes (5.8a), (5.8b) et (5.32)-(5.44).

$$\min R^s = \underbrace{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \cdot \eta_{ipt}^s \cdot \frac{q_{ip}^s}{\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} q_{ip}}}_{(5.29)a} - N \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \quad (5.29)$$

sous contraintes :

$$\sum_{t=1}^T x_{ipt}^s \leq 1, \quad \forall i, \forall p \quad (5.32)$$

$$\sum_{p=1}^{P_i} x_{ipt}^s \cdot q_{ip}^s \leq c_i, \quad \forall i, \forall t \quad (5.33)$$

$$o_t^s - (\xi_t^{\omega_s} - \lambda_{\omega_s}^s) \leq 1, \quad \forall t, \forall \omega_s, \quad (5.8a)$$

$$\sum_{\omega_s \in \tilde{\Omega}^s} \lambda_{\omega_s}^s \geq 1, \quad (5.8b)$$

$$x_{ipt}^s \leq g_{ipt}^s, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.34)$$

$$M \cdot x_{ipt}^s \geq g_{ipt}^s, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.35)$$

$$o_t^s \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipt}^s, \quad \forall t \quad (5.36)$$

$$M \cdot o_t^s \geq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{P_i} g_{ipt}^s, \quad \forall t \quad (5.37)$$

$$g_{ipt}^s \cdot ((s-1) \cdot T + t - d_{ip}) \geq 0, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.38)$$

$$g_{ipt}^s \geq g_{ip(t-1)}^s - \sum_{t'=1}^{t-1} x_{ipt'}^s + o_t^s - 1, \quad \forall i, \forall p, \forall t > 1 \quad (5.39)$$

$$x_{ipt}^s = x_{ipt}^s(x_{ipt}^{[s-1]}), \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.40)$$

$$g_{ipt}^s = g_{ipt}^s(g_{ipt}^{[s-1]}), \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.41)$$

$$0 \leq x_{ipt}^s \leq 1, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.42)$$

$$o_t^s \in \{0, 1\}, \quad \forall t \quad (5.43)$$

$$g_{ipt}^s \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad (5.44)$$

Pour résoudre le problème $\mathcal{P}_{s\text{-step}}^{\text{MIP}}$, nous proposons une méthodologie dynamique pro-active (abrégée APD), dont le pseudo-code est présenté ci-dessous. Permettant de traduire fidèlement le processus de décision exogène de Markov, cette approche est capable de proposer des solutions réactives au déroulement dynamique de l'activité de récolte.

Algorithme 5.1 : Approche Dynamique Pro-active (ADP)

```

1: définir  $s := 1$ 
2: calculer  $\Delta^s$ 
3: répéter
4:   résoudre  $\mathcal{P}_{s\text{-step}}^{\text{MIP}}$  et trouver  $\langle x^*, g^*, r^* \rangle$ 
5:   observer  $(\xi, \langle x^*, g^*, r^* \rangle)$ 
6:    $s := s+1$ 
7:   calculer  $\Delta^s$ 
8: jusqu'à  $\Delta^s = 0$ 
9: STOP

```

5.4 Résultats numériques

Le modèle stochastique et la méthodologie dynamique pro-active proposée conjointement dans ce chapitre, ont été spécialement conçus pour planifier la récolte du blé, en contrôlant la dégradation de sa qualité. Pour la coopérative concernée par cette thèse, la production du blé s'élève à environ 45-60 % de sa production céréalière annuelle totale.

Les instances utilisées s'appuient sur des informations issues des campagnes agricoles antérieures de l'étude de cas visé et sur des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs. Généralement, la saison de récolte dure approximativement un mois, voire un mois et demi. Pendant cette période, les pronostics météorologiques sont fournis par les stations météorologiques situées à proximité du périmètre de la coopérative concernée, pour une période relativement courte (environ 5-7 périodes de temps), avec un niveau de confiance acceptable (la variance des variables aléatoires météorologiques journalières varie entre 0.04 et 0.09, $\sigma_\xi^2 \in [0.04, 0.09]$). Les informations concernant les stades de maturités biologiques des variétés de blé sont souvent données par des organisations compétentes dans les métiers de l'agronomie, en particulier de l'agriculture céréalière¹. Les tests numériques ont été effectués pour 19 chantiers agricoles ayant un nombre de parcelles compris entre 2 et 20 avec une capacité journalière qui varie entre 80 et 381 tonnes. Pour garantir la confidentialité, les données ont été légèrement modifiées.

L'approche dynamique pro-active a été implémentée en C++. Les sous-problèmes déterministes équivalents correspondant à chaque étape, $\mathcal{P}_{s\text{-step}}^{\text{MIP}}$, ont été résolus en utilisant le solveur d'optimisation ILOG CPLEX (version 12.6.0) avec un niveau de confiance de $(1 - \alpha) \geq 0.8$.

Afin de vérifier la faisabilité et l'efficacité de l'approche pro-active dynamique proposée dans un environnement réaliste, les incertitudes météorologiques et les réalisations des solutions proposées à chaque étape sont reproduites en utilisant le logiciel commercial de simulation SIMAN dans l'environnement Arena Rockwell Automation (version 13.0). L'intégration entre les logiciels ILOG CPLEX et Arena (les deux étant des *composants pris sur étagère*² commercialement disponibles) a été réalisée *via*

1. Les dates de maturité et les indices de chute de Hagberg ont été fournies par l'Institut du Végétal Arvalis.

2. Un composant pris sur étagère (*Commercial Off-The-Shelf* ou COTS, en anglais) est un produit logiciel existant en de multiples copies, dont le code source est disponible ou non, vendu, loué ou fourni gratuitement par un vendeur et ayant des mises à jour périodiques s'accompagnant d'un accroissement des fonctionnalités fournies alors que certaines autres deviennent obsolètes (Roose, 2007). Étant développés par des tierces organismes commerciales sans concertation, l'intégration de ces composants n'est pas toujours possible, dégageant de nombreux problèmes de composition et de typage.

une application utilisateur comme illustré dans la Fig. D.1.

Tableau 5.1 – ADP vs. SHG pour 10 instances

Instance (\mathcal{I})	ADP		SHG	
	δ	écart relatif (%)	δ	écart relatif (%)
1	5	3.94	5	14.96
2	6	3.68	5	26.28
3	6	3.66	6	11.67
4	5	5.76	5	19.83
5	6	6.08	6	31.42
6	8	7.70	7	27.77
7	6	5.30	5	32.97
8	7	5.89	6	41.16
9	6	6.68	6	24.39
10	6	7.01	5	33.99
moyenne		5.57		26.44

Contrairement aux problèmes déterministes, pour lesquels la mesure de performance est tangible (*e.g.* qualité de la solution, temps de calcul, etc.), la classe de problèmes stochastiques nécessite l'utilisation d'autres indicateurs de performance pour l'évaluation d'une méthode ou d'un modèle particuliers (Pillac et al., 2013). Dans cette optique, pour évaluer la faisabilité et la robustesse du modèle probabiliste multi-étapes à horizon glissant et de la méthodologie dynamique pro-active proposés dans ce chapitre, les expérimentations numériques ont été menées en comparant les métriques de performance suivantes :

- $\nu(\text{SHG})$: la valeur espérée obtenue en utilisant la version statique du modèle $\mathcal{P}_{\text{S-étapes}}^{\text{II}}$ dans un cadre glissant (SHG) (Wagner and Berman, 1995). Cette approche de résolution n'exige ni la notion d'état du système ni les contraintes de transition (5.30) et (5.31), *i.e.* aucun ajustement des réalisations des solutions n'est fait.
- $\nu(\text{ADP})$: la valeur espérée obtenue en utilisant la méthodologie dynamique et pro-active proposée dans la section 5.3.
- VOS : la valeur observée après l'implémentation de la solution proposée dans un environnement réaliste, reproduit *via* un modèle de simulation à événements discrets spécialement créé pour ce faire.

Dans un premier temps, regardons le tableau 5.2, qui reporte les résultats pour 10 instances inspirées de l'étude de cas concerné par cette thèse. L'écart pour une instance \mathcal{I} à l'étape s est défini par le rapport $\frac{\Theta^s(\mathcal{I}) - \tilde{\Theta}^s(\mathcal{I})}{\tilde{\Theta}^s(\mathcal{I})}$, où $\Theta^s(\mathcal{I})$ représente la quantité totale à récolter trouvée par l'approche ADP à l'étape s et $\tilde{\Theta}^s(\mathcal{I})$ dénote la valeur de la quantité totale VOS à la même étape. Bien plus, les nombres de liquéfaction du mélange collecté à l'étape s , η_M^s , calculés en outre par l'expression (5.29)a, et leurs valeurs observées $\tilde{\eta}_M^s$ sont détaillés dans la quatrième et la sixième colonne. Il est à noter que le temps de calcul d'une solution à chaque étape par AFP s'élève moyennement à 0.53 secondes et à 50 secondes pour la simulation lancée ultérieurement, tandis que le temps de transition du module d'optimisation à celui de simulation est négligeable.

Tableau 5.2 – ADP vs. VOS pour 10 instances

Instance (\mathcal{I})	étape	ADP		VOS		écart relatif (%)
		Θ^s	η_M^s	$\tilde{\Theta}^s$	$\tilde{\eta}_M^s$	
1	1	18021.40	22.21	17444.80	22.21	3.31
	2	16336.40	23.56	15337.20	23.57	6.51
	3	13082.20	22.98	12617.90	22.95	3.68
	4	7219.60	22.47	6800.63	22.46	6.16
	5	902.64	21.40	902.43	21.40	0.02
2	1	18065.90	21.80	16980.60	21.82	6.39
	2	16050.40	23.04	15323.00	22.91	4.75
	3	12266.20	22.64	11842.80	22.70	3.58
	4	7022.64	22.89	6541.47	22.64	7.36
	5	2427.27	24.60	2427.02	24.60	0.01
	6	67.08	25.92	67.07	25.92	0.01
3	1	18023.20	21.38	16807.80	21.47	7.23
	2	16496.50	23.42	15644.20	23.31	5.45
	3	12341.70	24.41	11547.30	24.39	6.88
	4	7696.28	23.82	7516.45	23.75	2.39
	5	2619.73	24.02	2619.69	24.02	0.00
	6	109.61	23.84	109.60	23.84	0.01
4	1	18199.70	22.06	17260.20	22.11	5.44
	2	16029.90	23.83	15162.70	23.98	5.72
	3	10807.10	23.57	10448.30	23.62	3.43
	4	3505.54	23.42	3069.75	23.40	14.20
	5	768.86	24.29	768.73	24.29	0.02
5	1	18318.70	21.43	16705.50	21.40	9.66
	2	16716.90	22.51	15477.70	22.52	8.01
	3	12707.10	22.88	11975.00	22.98	6.11
	4	7601.56	23.38	6871.71	23.47	10.62
	5	2235.07	23.11	2190.03	23.14	2.06
	6	206.84	21.30	206.80	21.30	0.02
6	1	13739.00	21.73	12346.20	21.58	11.28
	2	13071.90	23.75	12010.10	23.83	8.84
	3	11028.20	23.20	9693.56	23.26	13.77
	4	9926.72	23.33	9192.01	23.42	7.99
	5	6042.01	21.74	5096.05	21.59	18.56
	6	3185.45	24.16	3148.89	24.18	1.16
	7	351.58	24.14	351.53	24.14	0.01
	8	146.26	25.70	146.25	25.70	0.01
7	1	18284.70	22.17	17098.60	22.15	6.94
	2	16428.50	23.76	15485.60	23.78	6.09
	3	14862.10	24.04	13267.10	23.90	12.02
	4	10250.80	24.39	9702.74	24.38	5.65
	5	1598.04	23.56	1580.67	23.53	1.10
	6	145.21	20.54	145.19	20.54	0.02
8	1	18160.10	22.11	16741.60	22.22	8.47
	2	16119.90	23.22	14806.50	23.29	8.87
	3	12748.10	23.21	11454.90	23.23	11.29
	4	6501.23	22.85	6148.78	22.93	5.73
	5	2034.21	21.79	1916.70	21.94	6.13
	6	118.02	19.41	117.19	19.41	0.70
	7	0.83	19.42	0.83	19.42	0.01
9	1	18189.40	22.33	16775.80	22.26	8.43
	2	16773.00	24.69	15758.50	24.78	6.44
	3	14375.50	23.38	13147.60	23.24	9.34
	4	9338.02	23.59	8370.40	23.50	11.56
	5	2850.79	23.56	2733.49	23.74	4.29
	6	340.16	21.45	340.14	21.45	0.01
10	1	18318.70	21.51	17265.30	21.53	6.10
	2	16910.00	24.32	15381.10	24.39	9.94
	3	12869.40	23.08	11375.40	23.19	13.13
	4	10364.80	23.82	9502.59	23.72	9.07
	5	3516.03	24.79	3388.68	24.98	3.76
	6	128.10	19.74	128.06	19.74	0.03

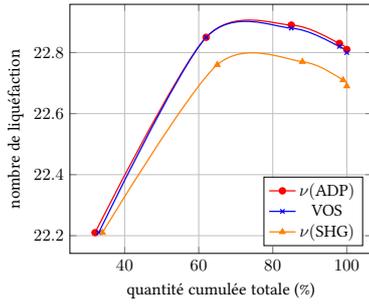


FIGURE 5.2 - Instance 1

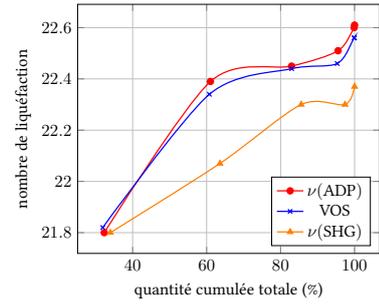
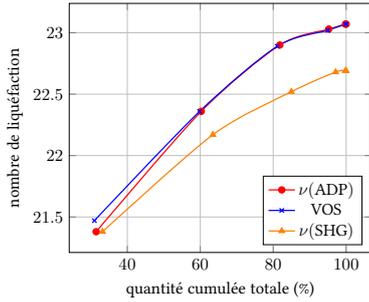


FIGURE 5.3 - Instance 2

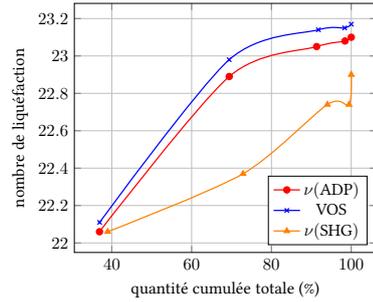


FIGURE 5.4 - Instance 3

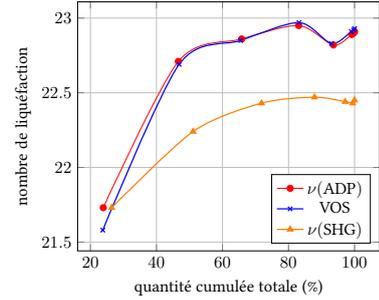
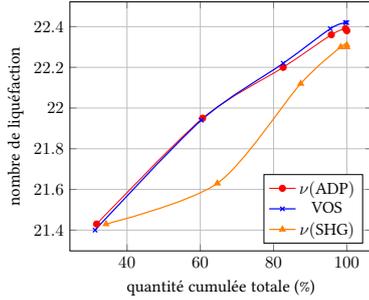


FIGURE 5.5 - Instance 4

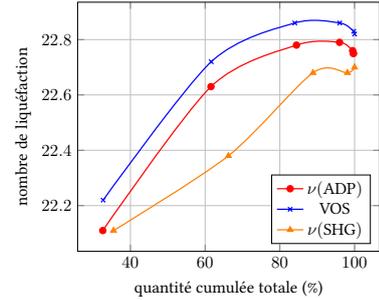
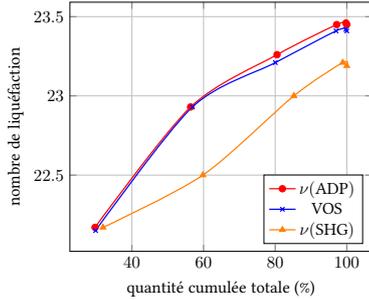


FIGURE 5.6 - Instance 5

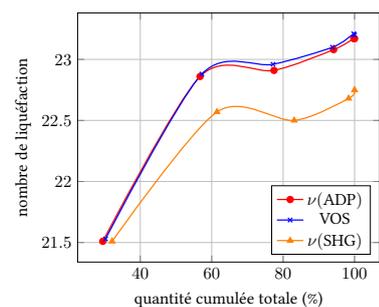
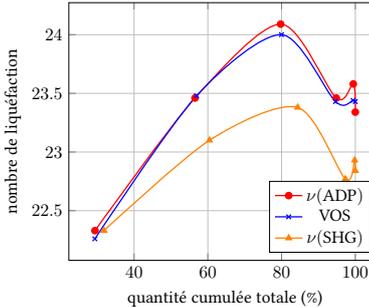


FIGURE 5.7 - Instance 6

FIGURE 5.8 - Instance 7

Remarquons dans le tableau 5.2 qu'aucun écart entre les approches ADP et VOS n'est propagé le long de différentes étapes s . Si c'est le cas, l'approche ADP ajuste les solutions durant les étapes suivantes. En effet, ADP se comporte d'une manière assez flexible et propose des solutions suffisamment immunes vis-à-vis d'éventuelles intempéries imprévues.

Dans le tableau 5.1, les approches ADP et SHG sont comparées. Plus précisément, dans la deuxième et quatrième colonne le degré de dynamisme induit δ est donné. Ceci représente le nombre d'étapes induites par l'approche utilisée. Pour chaque instance, la troisième et la cinquième colonne fournissent les écarts relatifs moyens calculés entre la solution proposée et sa réalisation observée *via* la simulation au cours des étapes induites. Ces résultats illustrent que l'approche ADP surpasse systématiquement et considérablement l'approche SHG. Même si parfois SHG induit une valeur inférieure de δ , qui bien entendu entraîne des temps de calcul plus réduits, ADP présente des résultats nettement plus compétitifs, en moyenne 5.57 versus 26.44.

Tout en minimisant le nombre de liquéfaction du mélange de blé provenant de toutes les parcelles considérées, les Fig. 5.2 - 5.11 montrent graphiquement l'état d'avancement de la récolte, à travers le prisme des trois approches : SHG, ADP et VOS. Même si SHG se comporte de manière suffisamment adéquate et pro-active comme l'atteste les graphiques, aucun ajustement de solutions n'a lieu, ce qui provoque la diffusion des écarts antérieurs en impactant ainsi considérablement la qualité du mélange total du blé collecté.

D'autre part, tel que le présentent les figures 5.2 - 5.11, l'approche ADP suit le concours réaliste de circonstances reproduit *via* VOS, en proposant des solutions immunes face aux aléas météorologiques et en remédiant les écarts enregistrés entre les solutions antérieurement proposées et leurs implémentations *de facto*.

5.5 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de planification de récolte du blé, modélisé sous la forme d'un programme stochastique dans un contexte décisionnel multi-étapes à horizon glissant. Pour résoudre ce problème, une approche pro-active dynamique est élaborée et testée sur des jeux de données provenant de l'application réelle. Tel que le montrent les expérimentations numériques, l'approche proposée présente des résultats, d'une part, stables vis-à-vis des aléas météorologiques, et d'autre part, réactifs au déroulement dynamique de la moisson. Nous soutenons que la méthodologie proposée dans ce chapitre peut être employée dans la résolution de différents problèmes de planification de récolte affectés par des incertitudes exogènes, dans le cas où la récolte soit avant, soit après les dates de maturité est uniquement autorisée (e.g. la récolte du raisin, etc.).

Une piste évidente qui s'ouvre à la suite du travail présenté dans ce chapitre, consiste à rendre possible simultanément les récoltes tardives et prématurées. En l'occurrence, la propriété de sous-optimalité n'est plus vérifiée dans ce cas. Il conviendrait donc de s'intéresser à des méthodologies permettant d'une part, de prendre en compte les deux aspects, stochastique et dynamique, et d'autre part, de donner la possibilité de corriger, éventuellement à moindre coût, les décisions prises avant la survenue des aléas. Intuitivement, des méthodes basées sur la programmation multi-étapes avec recours et la programmation stochastique dynamique pourront être adaptées et combinées à cet effet.

Techniques statistiques de prévision des livraisons

“ Se projeter dans l’avenir et transmettre une coopérative aux générations futures, c’est en appuyant sur adhérents et collaborateurs que la SCARA conduit ses projets. Direction, managers, équipes et représentants du personnel, poursuivrons la construction de véritables leviers de motivation et de réussite...”

Céline GILLET, Responsable Administratif et Financier, SCARA

”

Sommaire

6.1 Introduction	79
6.2 Description du problème	81
6.3 Méthodologie	83
6.3.1 Régression basée sur données de panel	83
6.3.2 Régression multivariée par spline adaptative	86
6.4 Résultats numériques	87
6.4.1 Estimation et apprentissage	88
6.4.2 Prévisions et validation	91
6.5 Conclusions	92

6.1 Introduction

Dans l’intention de guider l’organisation d’une réception convenable et d’un stockage approprié des céréales lors d’une campagne agricole, nous tenterons dans ce chapitre de décrire et de caractériser le comportement de livraison des agriculteurs, en le confrontant avec les facteurs climatiques qui peuvent être déterminants, à savoir le volume de précipitations et l’ensoleillement. Pour ce faire, nous nous proposons d’effectuer une analyse statistique en croisant les informations relatives à la récolte, collectées le long des campagnes agricoles des années précédentes, et d’expliquer ainsi l’évolution au cours de temps des livraisons journalières de récolte effectuées auprès de chaque silo concerné par cette étude.

Même si les collectes de céréales se déroulent dans un esprit similaire, chaque récolte est unique. Ainsi, vouloir caractériser un ensemble d'entités (*i.e.* campagnes agricoles) sur une suite de périodes de temps (*i.e.* durant l'horizon de récolte), nous avons recouru à des modèles et données de panel qui permettent d'explorer des données croisées ayant en plus une dimension temporelle. Les *données de panel* (aussi appelées *données croisées* ou *données longitudinales*) sont capables de capturer l'ensemble des hétérogénéités relatives au comportement d'entités ou d'individus par le biais des facteurs explicatifs (Wooldridge, 2010; Blommaert et al., 2014). Aux dires de Baltagi and Song (2006), en croisant des séries temporelles et des observations en coupe instantanée, les données de panel fournissent plus de données informatives, plus de variabilité, moins de colinéarité parmi les variables, plus de degré de liberté et plus de performance.

Sur le plan applicatif, les modèles de panel sont souvent utilisés pour révéler les variables significatives dans l'explication d'un comportement des entités provenant notamment des applications biomédicales (Zhu and Zhang, 2013), études économiques (Frees and Miller, 2004), évaluations des comportements sociaux (Tsai and Peng, 2012), etc.

En ce qui concerne le secteur de l'agriculture, il est à noter qu'il existe relativement peu de travaux basés sur de méthodes de données longitudinales. Une des exceptions pertinentes dans ce sens représente l'étude de Mundlak et al. (2012), qui analyse les incidences de ré-allocation des ressources traditionnelles dans le cadre de nouvelles techniques de production rencontrées dans différents pays *via* des fonctions de production agricole estimées à l'aide de modèles de panel. Se proposant d'évaluer les effets impartiaux et leur évolution au fil du temps, Kouser and Qaim (2011) se focalisent sur l'étude des impacts sanitaires résultant des changements apportés par les agriculteurs dans l'utilisation de pesticides chimiques. Pour ce faire, ces derniers auteurs ont exploité les seules données disponibles de panel construit sur la base des enquêtes réalisées en Inde.

Conscients d'autre part, d'éventuelles non-linéarités et de la présence des interactions entre les facteurs tributaires du comportement des agriculteurs durant la période de récolte quant aux livraisons journalières, nous avons également appliqué la régression multivariée par spline adaptative. Introduite par Friedman (1991), cette technique est devenue très populaire dans le domaine du data mining, dans la mesure où elle ne suppose ni impose aucun type de relations entre les variables explicatives et celles de réponse. En tant qu'un outil statistique souple et adaptable de construction des modèles prédictifs, la régression multivariée par spline adaptative est utilisée largement dans différents secteurs, tels que : le domaine du diagnostic médical (Chou et al., 2004; Chang et al., 2011), la gestion des relations clients, dans des applications soulevées dans la sphère du transport urbain (Miguéis et al., 2013), l'industrie des finances et du crédit (Lee et al., 2006), etc. Il est à noter également le travail de Butte et al. (2010) portant sur la comparaison et la combinaison des données de panel avec des techniques basées sur la régression multivariée par spline adaptative.

La suite de ce chapitre se décline en quatre sections. Dans la section suivante 6.2, l'activité de récolte est présentée au fil de son déroulement, à travers le prisme de plusieurs campagnes agricoles. Ensuite, nous nous attardons sur les deux techniques statistiques ayant retenu notre attention. Plus particulièrement, il s'agit de la régression basée sur données de panel, présentée en sous-section 6.3.1, et respectivement la régression multivariée par spline adaptative, détaillée en sous-section 6.3.2. Après avoir estimé les coefficients des modèles de panel dans la sous-section 6.4.1, nous nous préoccupons de la validation et de l'application des méthodes dans la section 6.4.2. Ce chapitre se termine avec la section 6.5, en résumant la contribution des techniques statistiques de prévision dans le secteur de l'agriculture.

6.2 Description du problème

En période de moisson, 3 silos d'expédition et 11 silos de collecte dispersés géographiquement (cf. Fig. 6.1), sont mis à la disposition des agriculteurs, pour assurer un stockage apte à garantir une conservation correcte des grains livrés. Les quantités à recevoir par chaque silo lors d'une campagne agricole ne sont connues que *post factum*. La coopérative dispose uniquement d'une information approximative sur la quantité totale à récolter durant la saison de récolte entière. Toutefois, celle-ci n'est pas suffisante dans la facilitation des réceptions de livraisons ou bien dans la minimisation des temps d'attente aux silos de stockage. La connaissance des livraisons journalières de récolte est particulièrement précieuse dans l'assurance de disponibilité en matière de capacité de stockage dans les silos de collecte, ayant des volumes limités.

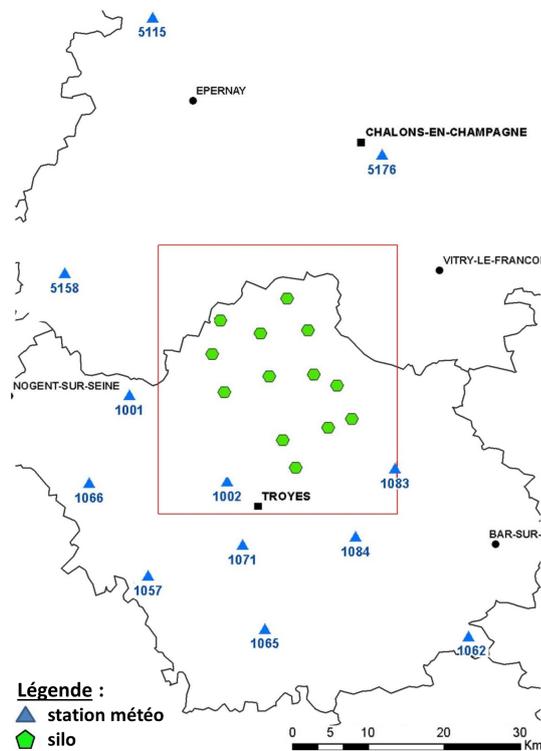


FIGURE 6.1 – Dispersion géographique des stations météorologiques et des silos de stockage

À titre d'exemple, examinons la Fig. 6.2, qui illustre les quantités journalières totales reçues par un silo typique de stockage en différentes sous-familles de céréales (cf. annexe C). Des écarts significatifs entre les quantités livrées quotidiennement peuvent être facilement discernés le long de différentes campagnes agricoles, qui changent entre autre au cours du temps. Il est parfaitement évident que les instants de temps constituant les saisons de récolte enregistrent des variations importantes. En d'autres termes, tant des variations relatives à la dimension temporelle usuelle que, de plus, des évolutions se rattachant à la dimension individuelle liée aux campagnes agricoles, sont perceptibles.

Il convient de mentionner que les livraisons auprès des silos de stockage débutent dès que les céréales atteignent leur maturité, les dates physiologiques de maturité optimale ne coïncidant pas forcément pour

différentes parcelles. Typiquement, l'horizon de récolte s'échelonne sur une période de trois mois : juin, juillet et août.

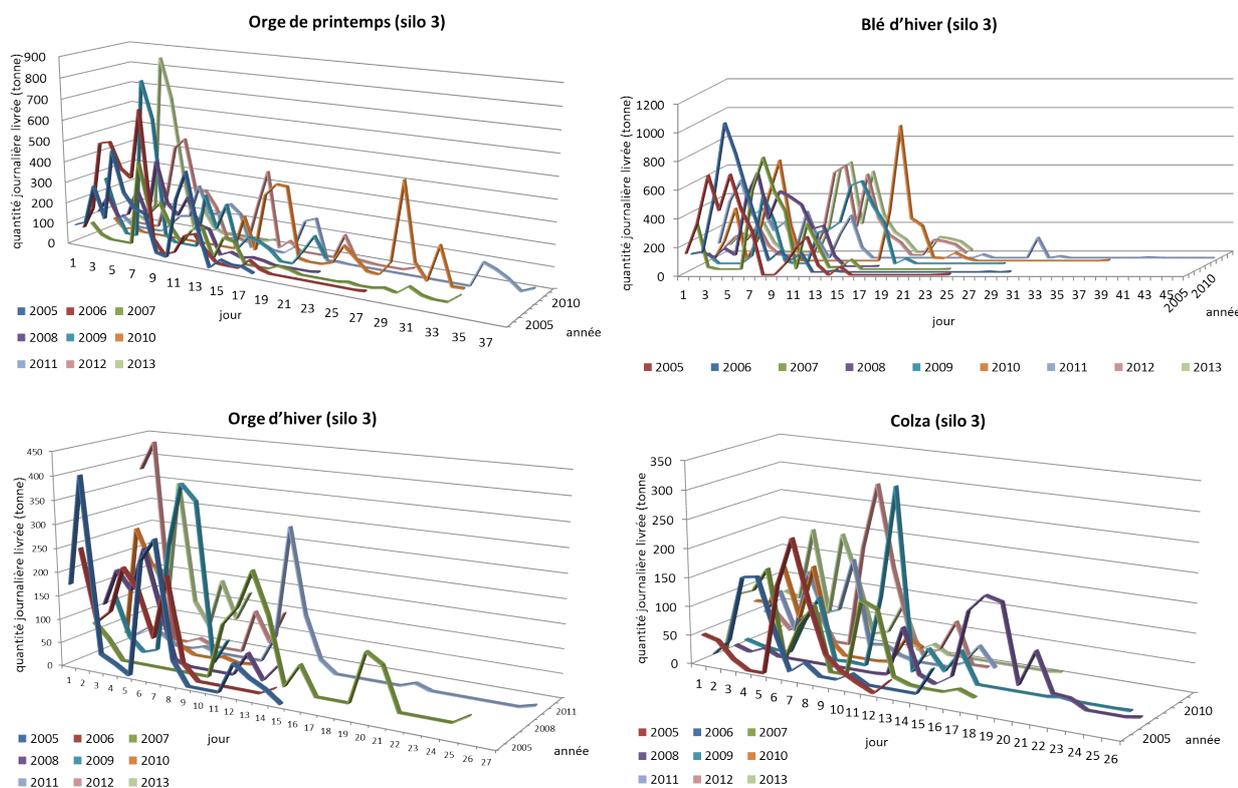


FIGURE 6.2 – Les quantités journalières totales livrées au silo 3 durant les campagnes agricoles datant de 2005 à 2013

En ce qui concerne le déroulement de la récolte, bien évidemment ce sont la météo et la variabilité climatique qui représentent le facteur décisif, la récolte des céréales n'étant possible que les jours sans pluie. Outre le concours de circonstances météorologiques (précipitations, ensoleillement, etc.), les quantités journalières collectées par les agriculteurs sont conditionnées par le débit de leurs chantiers mécaniques entraînés dans le processus de récolte.

Afin de mieux organiser la réception des céréales collectées par les agriculteurs, nous nous proposons dans ce chapitre de décrire le comportement des agriculteurs pendant la période de récolte *via* leurs livraisons, qui bien entendu sont conditionnées par : la météo, les pratiques de récolte des agriculteurs, le débit des chantiers mécaniques, etc.

Pour ce faire, nous exploitons dans ce qui suit, 9 campagnes agricoles antérieures, dont les données relatives aux livraisons journalières en différentes sous-familles de céréales (orge d'hiver, orge de printemps, blé d'hiver, colza) sont organisées sous forme de panel. Sans négliger l'aspect météorologique, les enregistrements historiques relatifs aux volumes de précipitations et durée d'ensoleillement journaliers provenant de la station météorologique Troyes Barberey (*cf.* Fig. 6.2) sont également pris en compte dans l'ajustement des modèles statistiques d'apprentissage et de prévision. À propos de l'étude de toutes ces données utilisées, les statistiques descriptives, visant les quantités journalières reçues dans chaque silo

de collecte pendant la récolte de céréales ainsi que les données météorologiques, sont reportées dans le tableau 6.1.

6.3 Méthodologie

Afin de caractériser et prévoir le comportement des agriculteurs relatif aux livraisons journalières pendant la période de récolte, nous adoptons la démarche suivante :

- explorer et modéliser les livraisons journalières à chaque silo de stockage pendant la période de récolte, en appliquant la régression fondée sur données de panel et la régression multivariée par splines adaptative, dans un échantillon constitué de 8 campagnes agricoles ;
- comparer les résultats obtenus par ces deux approches en estimant les erreurs de prévision pour une campagne agricole hors échantillon ;
- choisir une de méthodes proposées dans ce chapitre en fonction de ses capacités de prévision.

6.3.1 Régression basée sur données de panel

Les données de panel représentent une collection d'observations enregistrées à différents instants (*i.e.* répétées dans le temps) sur un ensemble d'entités (individus ou sujets), possédant deux dimensions, individuelle et temporelle. Elles permettent l'analyse en coupe transversale pour l'ensemble d'entités d'une part, et l'étude temporelle en coupe longitudinale, d'autre part. Contrairement aux séries temporelles utilisées souvent pour effectuer des prévisions en étudiant l'évolution des variables au cours du temps, les données de panel sont employées pour les prévisions en tant que structure révélatrice des variables significatives dans l'explication d'un comportement (production, consommation, etc.).

Tableau 6.2 – Techniques statistiques de prévision des livraisons de collecte : *notations*

Indices	
N	nombre d'observations répétées dans le temps
$s, s \in S$	silo de stockage (de collecte et d'expédition)
$v, v \in V$	sous-famille de céréales
$i, i \in I_s^v$	campagne agricole
$t_i^{sv}, i \in I_s^v$	horizon de livraison des céréales de la sous-famille v livrées au silo s correspondant à la campagne agricole i
$j, j \in t_i^{sv}$	période de temps (<i>i.e.</i> jour)
Variables :	
<i>Variables expliquées :</i>	
q_{ij}^{sv}	quantité journalière de céréales de la sous-famille v livrée au silo s le jour j correspondant à la campagne agricole i
<i>Variables explicatives :</i>	
r_{ij}^{sv}	quantité résiduelle de céréales de la sous-famille v à recevoir par le silo s le jour j correspondant à la campagne agricole i
p_{ij}	volume de précipitations (mm) tombé le jour j correspondant à la campagne agricole i
l_{ij}	durée de l'ensoleillement (minutes) le jour j correspondant à la campagne agricole i

Tableau 6.1 – Statistiques descriptives : la livraison de récolte et la météo

silo variable	Orge d'hiver				Orge de printemps				Blé d'hiver				Colza								
	N	moyenne	σ	min max	N	moyenne	σ	min max	N	moyenne	σ	min max	N	moyenne	σ	min max					
1	q_{ij}^{80}	213	64.61	138.16	0	676.30	324	352.53	594.79	0	2919.20	467	250.76	537.79	0	3010.98	204	142.15	239.53	0	1326.58
	r_{ij}^{80}	213	323.99	494.19	0	2038.72	324	355.65	4863.34	0	15225.82	467	3520.62	5184.01	0	14626.97	204	832.35	1191.46	0	3567.74
2	q_{ij}^{80}	275	38.24	105.99	0	659.94	411	157.71	322.53	0	1810.44	345	164.65	347.81	0	2126.57	198	86.40	141.96	0	719.86
	r_{ij}^{80}	275	161.80	318.71	0	1657.50	411	1973.38	2671.58	0	7952.66	345	1475.67	2181.49	0	6804.24	198	439.15	596.58	0	2081.87
3	q_{ij}^{80}	132	68.42	101.96	0	437.08	239	89.8	146.24	0	841.2	254	131.08	216.03	0	1044.85	184	35.98	58.85	0	316.46
	r_{ij}^{80}	132	324.30	344.10	0	1184.39	239	798.34	831.14	0	3011.01	254	981.48	1289.97	0	4028.11	184	240.17	284.81	0	865.21
4	q_{ij}^{80}	105	85.97	122.46	0	490.70	196	208.41	281.80	0	1457.31	232	249.60	380.25	0	1863.00	149	89.31	134.50	0	557.69
	r_{ij}^{80}	105	411.19	405.79	0	1498.12	196	1591.02	1727.95	0	5533.28	232	1930.35	2327.42	0	7538.86	149	560.48	600.95	0	1975.22
5	q_{ij}^{80}	144	67.14	135.54	0	883.36	213	188.13	255.38	0	1157.56	208	220.06	324.25	0	1380.96	120	95.86	123.58	0	526.78
	r_{ij}^{80}	144	393.91	471.34	0	1885.15	213	1618.66	1726.25	0	5297.31	208	1854.87	1960.74	0	6253.66	120	431.28	468.69	0	1371.19
6	q_{ij}^{80}	102	64.44	108.74	0	545.60	222	115.62	164.75	0	826.00	161	196.66	238.15	0	926.79	145	81.63	114.91	0	583.60
	r_{ij}^{80}	102	267.38	268.49	0	1267.15	222	875.73	1085.43	0	4573.75	161	1196.81	1246.36	0	4460.79	145	427.45	500.87	0	1788.53
7	q_{ij}^{80}	90	119.91	151.78	0	596.32	205	243.05	313.52	0	1254.41	187	271.81	347.48	0	1370.04	143	126.87	165.61	0	676.48
	r_{ij}^{80}	90	490.36	471.30	0	1908.53	205	1940.24	2111.87	0	6640.07	187	2058.39	2101.62	0	6302.49	143	676.49	744.04	0	2243.58
8	q_{ij}^{80}	82	63.22	90.30	0	327.99	143	178.70	185.19	0	855.47	184	163.70	224.77	0	1060.30	145	67.72	94.26	0	377.41
	r_{ij}^{80}	82	246.23	200.37	0	787.36	143	1383.00	1065.95	0	3447.50	184	1029.52	1150.94	0	3798.65	145	448.59	449.80	0	1307.91
9	q_{ij}^{80}	121	75.08	132.52	0	658.24	218	158.71	228.59	0	1125.35	212	215.06	313.994	0	1479.38	136	90.00	122.61	0	654.07
	r_{ij}^{80}	121	353.76	400.44	0	1413.38	218	1365.72	1520.68	0	5638.10	212	1485.86	1766.53	0	6292.81	136	457.89	500.21	0	1707.58
10	q_{ij}^{80}	132	71.18	121.78	0	495.57	217	105.74	174.49	0	1086.84	259	164.00	297.08	0	1753.76	153	58.76	87.11	0	393.01
	r_{ij}^{80}	132	370.62	418.55	0	1369.55	217	778.12	955.44	0	3357.71	259	1450.10	1863.49	0	5928.40	153	315.04	372.95	0	1112.71
11	q_{ij}^{80}	144	37.99	55.13	0	212.01	317	93.72	140.51	0	594.65	232	147.84	222.02	0	952.00	173	49.84	73.45	0	312.51
	r_{ij}^{80}	144	231.52	231.74	0	854.71	317	980.80	1213.41	0	4388.36	232	925.78	1208.52	0	5347.50	173	356.80	372.48	0	1290.6
12	q_{ij}^{80}	146	100.37	151.54	0	890.63	347	179.51	340.252	0	2093.55	325	215.61	412.01	0	1752.26	144	48.30	84.37	0	503.00
	r_{ij}^{80}	146	514.38	579.08	0	2239.42	347	2047.68	2848.83	0	10071.44	325	1660.73	2584.99	0	9249.55	144	335.10	441.86	0	2473.68
13	q_{ij}^{80}	143	92.41	143.68	0	631.97	297	256.44	395.79	0	2163.28	286	367.51	572.92	0	2599.70	215	62.24	118.23	0	893.31
	r_{ij}^{80}	143	471.92	524.93	0	524.93	297	2787.15	3721.65	0	13240.51	286	3808.4	4390.94	0	4390.94	215	394.88	118.23	0	2046.93

variable	Juin				Juillet				Août			
	N	moyenne	σ	min max	N	moyenne	σ	min max	N	moyenne	σ	min max
p_{ij}	270	1.88	3.81	0 26.2 279	2.12	4.70	0 35.0 279	1.85	4.75	0 45.0		
l_{ij}	270	452.61	277.20	0 930.0 279	467.39	272.50	0 918.0 279	413.33	242.28	0 866.0		

Pour chaque silo s et chaque sous-famille de céréales v définissons donc le panel non-compensé¹ Π_s^v , qui contient I_s^v sujets ou entités (*i.e.* campagne agricole). Chacun de ceux-ci comportent 4 observations répétées dans le temps, allant du premier jour de récolte jusqu'à la fin de la campagne agricole, *i.e.* à partir de 1 jusqu'au t_i^{sv} ($j = \overline{1, t_i^{sv}}$), à savoir : quantité journalière de livraison q_{ij}^{sv} , quantité résiduelle r_{ij}^{sv} , volume de précipitation (mm) p_{ij} , et la durée de l'ensoleillement (minutes) l_{ij} . Toutes les variables et les mesures susmentionnées sont organisées dans le tableau récapitulatif 6.2.

Deux modèles de panel sont principalement appliqués pour contrôler la présence d'hétérogénéités des variables individuelles inobservables : le modèle à effet individuel aléatoire et le modèle à effet fixe. Le premier modèle, également appelé *modèle de la covariance*, présuppose une absence de corrélation entre les variables individuelles inobservables et les variables explicatives du modèle, tandis que le second modèle, autrement nommé *modèle à erreur composée*, autorise cette corrélation.

Les équations correspondant au modèle à effet fixe (6.1), et respectivement au modèle à effet individuel aléatoire (6.2), sont écrites sous la forme suivante, $\forall s \in S, \forall v \in V$:

$$q_{ij}^{sv} = (\alpha + u_i) + r_{ij}^{sv} \beta^r + p_{ij} \beta^p + l_{ij} \beta^l + v_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (6.1)$$

$$q_{ij}^{sv} = \alpha + r_{ij}^{sv} \beta^r + p_{ij} \beta^p + l_{ij} \beta^l + (u_i + v_{ij}) \quad \forall i, \forall j \quad (6.2)$$

où q_{ij}^{sv} représente la variable à expliquer (endogène), alors que r_{ij}^{sv} , p_{ij} et l_{ij} sont les variables explicatives pour la quantité résiduelle de céréales de la sous-famille v à recevoir par le silo s le jour j correspondant à la campagne agricole i , le volume de précipitation tombé le jour j correspondant à la campagne agricole i , et respectivement la durée de l'ensoleillement le jour j correspondant à la campagne agricole i . Les paramètres β^r , β^p et β^l désignent les coefficients de régression associés aux co-variables r_{ij}^{sv} , p_{ij} et l_{ij} .

La variable u_i représente les effets individuels et regroupe toutes les variables individuelles fixes au cours de temps et qui ne sont pas observables (liés à la campagne agricole). Cette variable est aléatoire et fait partie de l'erreur dans le cadre du modèle à effet individuel aléatoire. En revanche, u_i est déterministe étant englobée dans la productivité globale des facteurs explicatifs. Enfin, v_{ij} expriment les résidus, qui sont considérés identiquement indépendant distribués $v_{ij} \sim \text{IID}(0, \sigma_v^2)$.

Plusieurs estimateurs des paramètres du modèle peuvent être obtenus en appliquant :

- ❑ **méthode des moindres carrés ordinaires sur données empilées** (*Pooled Ordinary Least Squares*, en anglais) : il est sans biais et à variance minimale. En effet, cet estimateur correspond à l'application des moindres carrés ordinaires sur des données transformées.
- ❑ **estimateur *between*** : il consiste à considérer pour chaque individu la moyenne temporelle de l'équation initiale. Les variations temporelles se volatilisent, car les estimations s'effectuent sur des moyennes temporelles en faveur des différences entre les individus.
- ❑ **estimateur *within*** : il est également sans biais et consiste à faire la différence entre le modèle initial et sa projection en *between*. Les effets individuels se volatilisent, en faveur des différences entre les variations temporelles manifestées autour d'une moyenne.

1. Un panel est nommé *non-compensé*, lorsque les nombres d'observations relatives à ses entités ne sont pas équivalents entre eux.

- **estimateur à effets aléatoires** (*error components model*, en anglais) : il est sans biais et convergent, dans le cadre duquel la composante individuelle des résidus disparaît et de même que les corrélations inter-individuelles des résidus.

Dans l'intention de capturer les similarités comportementales des agriculteurs en matière de livraisons des céréales pendant la période de récolte, l'estimateur *between* semble le plus approprié à ce stade d'étude. Plus particulièrement, il est capable d'examiner les relations entre les variables en coupe transversale pour toutes les campagnes agricoles dans l'échantillon sous étude :

$$q_{i\bullet}^{sv} = (\alpha + u_i) + r_{i\bullet}^{sv}\beta^r + p_{i\bullet}\beta^p + l_{i\bullet}\beta^l \quad (6.3)$$

où $q_{i\bullet}^{sv}$ représente la moyenne des variables à expliquer d'une entité individuelle i , alors que $r_{i\bullet}^{sv}$, $p_{i\bullet}$ et $l_{i\bullet}$ dénotent les moyennes des variables explicatives.

Le choix entre ces deux modèles se fait à l'aide des tests de spécification. Les effets fixes sont détectés par le test de Fisher, qui vise à vérifier la présence d'un effet aléatoire individuel significatif. Le test de Breusch-Pagan Lagrange Multiplier, quant à lui, examine les effets aléatoires. Effectivement, ceux-ci vérifient l'hypothèse nulle de la non-pertinence des effets individuels non-observés *versus* l'hypothèse alternative de pertinence des effets individuels non-observés. Lorsque l'hypothèse nulle n'est pas rejetée dans les deux cas, l'application de la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS) est recommandable :

$$q_{ij}^{sv} = \alpha + r_{ij}^{sv}\beta^r + p_{ij}\beta^p + l_{ij}\beta^l + v_{ij} \quad (u_i = 0) \quad (6.4)$$

In contrario, si l'hypothèse nulle n'est pas rejetée, *i.e.* les effets individuels non-observés ne sont pas pertinents, la régression OLS n'est pas adaptée dans l'examen des relations potentielles entre les quantités de livraison journalière et ses co-variables, *i.e.* quantité résiduelle, volume de précipitations, durée de l'ensoleillement.

La sélection du modèle le plus pertinent se fait d'habitude par l'analyse de covariance. Lorsque les deux modèles à effet fixe et celui à effet individuel aléatoire sont appliqués, il est nécessaire de conduire le test de Hausman afin de vérifier s'il existe un effet individuel corrélé avec les variables explicatives, pour choisir ainsi l'estimateur le plus approprié (Rockafellar and Wets, 1991; Morgan et al., 1993). L'hypothèse nulle du test de Hausman postule que le modèle adapté est celui à effet individuel aléatoire *versus* l'alternative qui promeut le modèle à effet fixe.

6.3.2 Régression multivariée par spline adaptative

La régression multivariée par spline adaptative (en anglais *MARS* pour *Multivariate Adaptive Regression Splines*) est une technique exploratoire de régression non paramétrique pouvant être vue comme une extension des régressions linéaires qui modélisent automatiquement les éventuelles interactions et non-linéarités entre une variable dépendante et plusieurs variables explicatives. Plus précisément, c'est une méthode statistique qui permet d'obtenir de manière adaptative un estimateur $f(x)$ constitué de splines de régression multivariées, dont l'équation générale sous la forme d'une fonction linéaire additive de fonctions charnières est donnée ci-après :

$$\bar{f}(x) = \beta_0 + \sum_{u=1}^U \beta_u B_u(x) \quad (6.5)$$

où la sommation s'effectue sur U termes qui représentent l'ensemble de fonctions de base trouvées pour approcher les relations entre les variables explicatives et celle de réponse. En effet, la variable de réponse y est prévue en fonction de variables explicatives x et de leurs interactions. La fonction (6.5) est formée d'un coefficient constant de la fonction de base $B_0(x) = 1$ (i.e. un paramètre d'ordonnée à l'origine) et de la somme pondérée par le coefficient β_u d'une ou plusieurs fonctions de base $B_u(x)$, qui à leur tour, peuvent représenter une seule spline ou bien un produit de deux, voire plus, splines adaptative.

L'idée de base s'appuie sur le principe *divide et impera*, qui catalogue l'espace de données d'entrée (le domaine d'entrée) en différentes régions, chacune étant décrite par sa propre équation de régression. Ainsi, la mise en œuvre de MARS est une procédure en deux temps, de sélection des fonction de bases suivie d'élagage, qui s'applique de façon répétée jusqu'à l'obtention d'un modèle pertinent.

Dans un premier temps, la procédure de construction du modèle repose sur la régression par partitionnement récursif qui, à chaque étape, trouve l'endroit idéal où tronquer le domaine pour décrire le mieux possible la relation entre la variable de réponse et les variables explicatives à travers d'un ensemble de fonctions de base définies sur des régions disjointes. Au cours de cette recherche, un nombre de plus en plus important de fonctions de base est ajouté au modèle, tout en maximisant un critère de qualité d'ajustement global par les moindres carrés. En outre, la sélection des points de rupture se fait par l'intermédiaire des algorithmes de sélection progressive pas à pas (Friedman, 1991).

Après avoir terminé la sélection des fonctions de base, une procédure d'élagage est appliquée. Au cours de cette deuxième étape, le modèle est synthétisé en éliminant par les moindres carrés les fonctions de base qui sont associées à la plus faible amélioration de la qualité d'ajustement (Hastie et al., 2009).

6.4 Résultats numériques

Désireux de mieux satisfaire les livraisons de collecte des agriculteurs auprès de silos de stockage pendant la période de récolte, nous avons tenté d'expliquer et éventuellement d'anticiper leurs prestations céréalières. Dans cette optique, pour les 3 silos d'expédition et 11 silos de collecte, et pour 4 sous-familles de céréales (orge de printemps sb , orge d'hiver wb , blé d'hiver ww , et colza, r), des panels non-compensés ont été compilés préalablement. Ceux-ci ont été préparés sur la base de 9 campagnes agricoles historiques.

En ce qui concerne les données météorologiques, elles ont été prises sur le site d'Infoclimat¹ (www.infoclimat.fr). Nous avons collecté des données journalières historiques datant des années 2005 à 2013, correspondant aux mois de juin, juillet et août (périodes sur lesquelles la récolte s'étale), incluant : le volume de précipitations (mm) et la durée d'ensoleillement (min).

Les modèles basés sur données de panel, la technique multivariée par spline adaptative ainsi que les statistiques descriptives ont été conduits en utilisant le logiciel de traitement des données et d'analyse statis-

1. Étant membre du Conseil Supérieur de la Météorologie (CSM), Infoclimat est également partenaire de Météo-France dans le cadre des Veilleurs du Temps.

tique R (version 3.0.2). Toutes les expérimentations numériques ont été effectuées sur une machine Intel(R) Core(TM) i7-2720QM CPU à 2.20GHz.

Dans la sous-section suivante, les modèles basés sur données de panel et la régression multivariée par spline adaptative sont ajustés et estimés pour un échantillon incluant 8 campagnes agricoles (de 2005 à 2012) sélectionnées pour l'apprentissage des modèles. Alors que dans la sous-section 6.4.2, leur capacité de prévision (capacité de généralisation) est comparée pour une campagne agricole (2013) hors-échantillon.

6.4.1 Estimation et apprentissage

Commençons par l'exploitation des données de panel non-compensé relatives aux livraisons de collecte journalières des agriculteurs, nous permettant d'expliquer éventuellement l'évolution temporelle et individuelle au cours de différentes saisons de récolte et d'appréhender le comportement des agriculteurs.

Après le dressage et la détermination des coefficients correspondant aux modèles à effet fixe (6.1) et celui à effet individuel aléatoire (6.2) par :

- la méthode des moindres carrés ordinaires sur données empilées (Pooled OLS)
- l'estimateur *within* (FE-within)
- l'estimateur *between* (BE)
- l'estimateur à effets aléatoire (RE)

les tests suivants ont été également effectués :

- le test de Fisher (F-test) pour vérifier s'il existe un effet aléatoire individuel important ;
- le test de Breusch-Pagan Lagrange Multiplier (BP) pour tester l'hypothèse d'homoscédasticité du terme d'erreur ;
- le test d'Hausman de spécification des effets individuels en panel, servant ainsi à discriminer les effets fixes et aléatoires.

Tels que les démontrent les résultats reportés dans les tableaux 6.3 et 6.4, pour les Π_2^{sb} , Π_7^r , Π_9^r et Π_5^{ww} les modèles *between* sont retenus, car le test de Fisher a été rejeté alors que le test de Breusch-Pagan Lagrange Multiplier n'a pas été rejeté. Les modèles à effets aléatoires sont plus pertinents pour Π_8^{ww} et Π_{11}^r , parce que le test de Fisher n'a pas été rejeté tandis que le test de Breusch-Pagan Lagrange Multiplier a été rejeté. Étant donné le fait que les tests de Fisher et celui de Breusch-Pagan Lagrange Multiplier n'ont pas été rejetés et le test d'Hausman n'a pas été rejeté non plus, les modèles à effets aléatoires sont sélectionnés pour les panels : Π_{12}^{sb} , Π_3^{wb} , Π_3^{sb} , Π_9^{sb} , Π_{12}^{sb} , Π_{ww}^{sb} , Π_{11}^{sb} , etc. Au contraire, les estimations *within* sont choisies pour les panels : Π_5^{sb} , Π_{10}^{sb} , Π_1^r , etc.

Toutefois, le modèle à effets aléatoires (RE) n'a pas été construit pour certains panels, e.g. Π_1^{wb} , Π_2^{wb} , Π_4^{wb} , Π_5^{wb} , etc. Ce fait s'explique par la variance négative estimée autour des effets individuels. Selon Wooldridge (2010), il n'existe pas de modèle à effets aléatoire adapté dans ce cas, le problème restant ouvert. Une façon triviale de contourner cet inconvénient consiste à substituer la variance négative par sa valeur limite (i.e. par la valeur 0). Ce qui revient à décider entre les modèles *within*, *between* et celui construit par la méthode des moindres carrés ordinaires sur données empilées.

Tableau 6.3 – Estimations des modèles de régression basée sur données de panel : orge d'hiver et orge de printemps

silo	Orge d'hiver				Orge de printemps				
	Pooled OLS	FE-within	BE	RE	Pooled OLS	FE-within	BE	RE	
1	r_{ij}^{SO}	0.074(0.018)	0.069(0.021)	0.079(0.043)	-	0.029(0.006)	0.028(0.007)	0.049(0.016)	-
	p_{ij}	-4.086(2.182)	3.467(2.247)	16.132(11.912)	-	-2.481(6.613)	-1.940(6.704)	-85.978(45.336)	-
	l_{ij}	0.146(0.037)	0.150(0.041)	0.213(0.085)	-	0.621(0.137)	0.632(0.141)	-0.746(0.810)	-
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.705(0.002)$ BP test is rejected with $p = 0.001$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.801(0.000)$ BP test isn't rejected with $p = 0.99$			
2	r_{ij}^{SO}	0.100(0.019)	0.092(0.022)	0.118(0.022)	-	0.026(0.005)	0.028(0.005)	0.008(0.026)	0.027(0.005)
	p_{ij}	0.412(1.404)	0.470(1.430)	0.448(7.970)	-	0.639(3.178)	0.776(3.080)	-13.895(36.209)	0.693(3.054)
	l_{ij}	0.088(0.024)	0.085(0.026)	0.154(0.057)	-	0.320(0.060)	0.326(0.062)	0.077(0.512)	0.321(0.061)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.906(0.000)$ BP test isn't rejected with $p = 0.840$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.405(0.001)$ BP test isn't rejected with $p = 0.069$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p=0.805(0.892)$			
3	r_{ij}^{SO}	0.010(0.007)	0.005(0.007)	0.046(0.021)	0.010(0.007)	0.022(0.010)	0.023(0.010)	0.043(0.035)	0.022(0.010)
	p_{ij}	-1.534(0.580)	-1.510(0.592)	-4.332(3.155)	-1.532(0.579)	0.344(1.824)	-0.372(1.844)	16.383(9.809)	0.240(1.822)
	l_{ij}	0.016(0.580)	0.0165(0.000)	0.016(0.001)	0.016(0.000)	0.180(0.032)	0.166(0.0323)	0.644(0.254)	0.178(0.032)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.345(0.013)$ BP test is rejected with $p < 2.694e - 08$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p=0.438(0.436)$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.086(0.004)$ BP test is rejected with $p < 7.598e - 07$ Hausman test of FE(BE) vs RE is/isn't rejected : $p=4.816e-09(0.098)$			
4	r_{ij}^{SO}	0.059(0.030)	0.044(0.034)	0.289(0.120)	-	0.034(0.011)	0.024(0.012)	0.119(0.044)	0.034(0.011)
	p_{ij}	1.881(3.260)	2.092(3.391)	8.783(14.495)	-	-0.838(4.793)	-1.673(4.873)	9.532(20.663)	-0.865(4.793)
	l_{ij}	0.130(0.049)	0.145(0.060)	0.313(0.162)	-	0.250(0.083)	0.271(0.083)	-0.457(0.462)	0.178(0.032)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.617(0.008)$ BP test is rejected with $p = 0.000$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.102(0.005)$ BP test is rejected with $p = 5.708e - 08$ Hausman test of FE(BE) vs RE is rejected : $p=0.000(0.012)$			
5	r_{ij}^{SO}	0.030(0.023)	0.017(0.025)	0.134(0.077)	-	0.019(0.009)	0.023(0.010)	0.049(0.041)	0.021(0.010)
	p_{ij}	0.747(2.767)	0.468(2.808)	-0.519(25.346)	-	1.190(4.655)	4.553(4.598)	-80.411(29.554)	2.012(4.623)
	l_{ij}	0.146(0.043)	0.153(0.050)	0.070(0.161)	-	0.360(0.068)	0.385(0.067)	-0.411(0.431)	0.366(0.068)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.589(0.007)$ BP test is rejected with $p = 1.148e - 06$				F-test of FE(BE) is rejected with $p = 0.008(0.006)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is rejected with $p = 3.98e - 05(0.015)$			
6	r_{ij}^{SO}	0.010(0.041)	0.026(0.043)	-0.001(0.180)	-	0.045(0.010)	0.026(0.011)	0.104(0.026)	-
	p_{ij}	1.215(2.897)	1.423(3.004)	-2.391(15.818)	-	-4.993(4.778)	-5.268(4.945)	-7.679(13.858)	-
	l_{ij}	0.139(0.045)	0.102(0.053)	0.250(0.130)	-	0.292(0.085)	0.301(0.087)	-0.041(0.307)	-
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.712(0.012)$ BP test is rejected with $p = 0.001$				F-test of FE(BE) is/isn't rejected with $p = 0.451(0.000)$ BP test isn't rejected with $p = 0.079$			
7	r_{ij}^{SO}	0.021(0.034)	-0.040(0.040)	0.139(0.063)	-	0.033(0.010)	0.035(0.010)	0.108(0.020)	-
	p_{ij}	-1.763(4.102)	0.187(4.139)	1.636(18.805)	-	-2.938(2.634)	-2.043(2.687)	-16.479(7.772)	-
	l_{ij}	0.196(0.064)	0.207(0.080)	0.202(0.099)	-	0.101(0.045)	0.089(0.046)	0.068(0.129)	-
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.179(0.012)$ BP test is rejected with $p = 6.999e - 07$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.238(0.000)$ BP test is rejected with $p = 0.002$			
8	r_{ij}^{SO}	-0.029(0.047)	-0.039(0.050)	-0.407(0.225)	-0.034(0.048)	-0.027(0.015)	-0.029(0.015)	0.036(0.052)	-
	p_{ij}	6.467(2.777)	5.325(2.684)	56.056(25.274)	5.913(2.673)	5.532(3.724)	-6.105(3.908)	8.960(12.405)	-
	l_{ij}	0.141(0.037)	0.166(0.042)	0.324(0.182)	0.151(0.039)	0.102(0.065)	0.119(0.068)	-0.062(0.186)	-
		F-test of FE(BE) is/isn't rejected with $p = 0.025(0.142)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't/is rejected with $p = 0.410(0.024)$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.841(0.001)$ BP test isn't rejected with $p = 0.747$			
9	r_{ij}^{SO}	0.005(0.029)	0.003(0.032)	0.022(0.066)	-	0.029(0.009)	0.023(0.010)	0.106(0.045)	0.027(0.010)
	p_{ij}	1.668(2.794)	1.625(2.895)	5.348(16.131)	-	-3.580(3.299)	-2.550(3.313)	-35.691(21.734)	-3.204(3.283)
	l_{ij}	0.214(0.048)	0.220(0.055)	0.215(0.124)	-	0.199(0.058)	0.200(0.059)	-0.316(0.414)	0.201(0.058)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.940(0.004)$ BP test isn't rejected with $p = 0.610$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.065(0.008)$ BP test is rejected with $p = 8.589e - 07$ Hausman test of FE(BE) vs RE is/isn't rejected with $p = 0.037(0.153)$			
10	r_{ij}^{SO}	0.021(0.024)	0.028(0.028)	0.026(0.054)	-	0.035(0.012)	0.030(0.012)	0.093(0.028)	0.033(0.012)
	p_{ij}	-3.242(2.158)	-2.965(2.196)	-18.734(14.619)	-	3.764(2.903)	5.893(2.929)	-35.556(16.157)	4.306(2.891)
	l_{ij}	0.137(0.039)	0.118(0.044)	0.185(0.091)	-	0.251(0.045)	0.253(0.046)	-0.118(0.277)	0.253(0.045)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.68(0.00)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$				F-test of FE(BE) is rejected with $p = 0.024(0.005)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is rejected with $p = 6.692e - 10(8.947e - 05)$			
11	r_{ij}^{SO}	0.006(0.023)	-0.164(0.055)	-0.003(0.047)	-	-0.011(0.009)	-0.015(0.010)	0.028(0.028)	0.033(0.006)
	p_{ij}	0.253(0.975)	0.005(0.946)	7.435(4.444)	-	-0.087(1.451)	-0.120(1.470)	-2.485(9.111)	-0.046(1.541)
	l_{ij}	0.034(0.017)	0.064(0.019)	-0.002(0.035)	-	0.146(0.029)	0.145(0.030)	-0.083(0.203)	0.147(0.031)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.404(0.000)$ BP test is rejected with $p = 2.129e - 10$				F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.270(0.001)$ BP test is rejected with $p = 0.010$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected with $p = 0.144(0.816)$			
12	r_{ij}^{SO}	0.024(0.027)	-0.051(0.050)	0.228(0.173)	0.023(0.028)	-0.002(0.008)	-0.013(0.011)	0.039(0.011)	0.023(0.028)
	p_{ij}	-1.015(3.174)	-1.920(3.222)	-2.247(18.784)	-1.032(3.173)	4.505(3.248)	4.452(3.246)	-54.623(50.122)	-1.032(3.173)
	l_{ij}	0.152(0.055)	0.186(0.059)	0.036(0.183)	0.152(0.055)	0.338(0.074)	0.337(0.077)	-0.148(0.534)	0.152(0.055)
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.523(0.015)$ BP test is rejected with $p = 0.000$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p=0.986(0.987)$				F-test of FE(BE) is rejected with $p = 0.053(0.009)$ BP test is rejected with $p = 4.204e - 10$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.670(0.692)$			
13	r_{ij}^{SO}	0.031(0.024)	0.025(0.026)	0.092(0.054)	-	0.021(0.005)	0.016(0.007)	4.0e-02(5.8e-03)	-
	p_{ij}	0.518(2.923)	0.438(3.021)	2.638(14.724)	-	0.192(4.449)	0.390(4.505)	1.0e+01(2.0e+01)	-
	l_{ij}	0.131(0.049)	0.143(0.058)	0.081(0.115)	-	0.514(0.089)	0.526(0.092)	1.7e-01(2.4e-01)	-
		F-test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.834(0.003)$ BP test isn't rejected with $p = 0.944$				F-test of FE(BE) is rejected with $p = 0.727(9.798e - 05)$ BP test isn't rejected with $p = 0.650$			

Tableau 6.4 – Estimations des modèles de régression basée sur données de panel : *blé d'hiver* et *colza*

silos	Blé d'hiver				Colza				
	Pooled OLS	FE-within	BE	RE	Pooled OLS	FE-within	BE	RE	
1	r_{ij}^{SO}	0.019(0.004)	0.025(0.005)	0.001(0.010)	-	0.062(0.014)	0.061(0.015)	0.054(0.071)	0.061(0.014)
	p_{ij}	4.492(5.168)	4.914(5.171)	-30.535(37.665)	-	3.113(3.461)	3.675(3.535)	-25.498(27.486)	3.225(3.468)
	l_{ij}	0.365(0.103)	0.412(0.105)	-0.525(0.535)	-	0.225(0.063)	0.221(0.068)	0.122(0.302)	0.226(0.064)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.08(8.191e - 05)$ BP test is rejected with $p = 0.03$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.510(0.010)$ BP test is rejected with $p = 0.004$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.930(0.058)$			
2	r_{ij}^{SO}	0.039(0.008)	0.039(0.008)	0.031(0.038)	0.039(0.008)	0.096(0.015)	0.095(0.015)	0.105(0.073)	0.095(0.015)
	p_{ij}	3.577(3.909)	2.610(3.939)	60.543(33.380)	3.478(3.908)	2.655(1.831)	2.971(1.880)	-5.807(10.584)	2.716(1.835)
	l_{ij}	0.278(0.079)	0.294(0.081)	0.516(0.459)	0.279(0.079)	0.113(0.033)	0.115(0.035)	0.106(0.156)	0.114(0.034)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.352(0.001)$ BP test is rejected with $p = 0.000$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.358(0.786)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.571(0.008)$ BP test is rejected with $p = 0.042$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.938(0.780)$			
3	r_{ij}^{SO}	0.046(0.010)	0.045(0.010)	0.045(0.036)	-	0.035(0.015)	0.0315(0.016)	0.068(0.064)	0.033(0.016)
	p_{ij}	-0.944(2.395)	-0.642(2.429)	-20.338(17.420)	-	0.464(1.057)	0.700(1.051)	-7.296(8.870)	0.580(1.040)
	l_{ij}	0.314(0.049)	0.3169(0.052)	0.223(0.204)	-	0.055(0.016)	0.070(0.018)	-0.016(0.051)	0.063(0.017)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.720(0.002)$ BP test isn't rejected with $p = 0.129$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.060(0.013)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p = 0.487(0.285)$			
4	r_{ij}^{SO}	0.046(0.010)	0.048(0.010)	0.034(0.082)	0.047(0.010)	0.018(0.018)	0.004(0.022)	0.061(0.007)	-
	p_{ij}	0.981(5.439)	-0.915(5.479)	43.719(35.920)	0.138(5.416)	4.041(2.533)	4.448(2.654)	-1.896(2.018)	-
	l_{ij}	0.407(0.096)	0.448(0.098)	0.032(0.667)	0.429(0.096)	0.158(0.045)	0.174(0.050)	0.008(0.025)	-
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.054(0.014)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p = 0.304(0.499)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.836(6.78e - 06)$ BP test isn't rejected with $p = 0.476$			
5	r_{ij}^{SO}	0.023(0.011)	0.017(0.012)	0.049(0.058)	0.021(0.012)	-0.032(0.035)	0.055(0.027)	-0.032(0.076)	-
	p_{ij}	-3.306(5.036)	-2.586(5.127)	-20.051(42.326)	-3.102(5.032)	3.084(2.174)	2.544(2.409)	11.111(8.984)	-
	l_{ij}	0.309(0.093)	0.355(0.095)	-0.321(0.574)	0.322(0.093)	0.127(0.044)	0.189(0.050)	0.120(0.151)	-
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.300(0.003)$ BP test isn't rejected with $p = 0.111$ Hausman test of FE(BE) vs RE is rejected : $p = 0.000(4.366e - 06)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.530(0.010)$ BP test isn't rejected with $p = 0.094$			
6	r_{ij}^{SO}	0.030(0.014)	0.028(0.014)	0.026(0.040)	-	0.068(0.020)	0.065(0.021)	0.168(0.136)	0.067(0.020)
	p_{ij}	0.915(3.717)	-0.977(3.861)	20.907(15.705)	-	3.772(2.044)	4.120(2.155)	-3.644(11.301)	3.908(2.071)
	l_{ij}	0.338(0.071)	0.357(0.072)	0.246(0.364)	-	0.114(0.033)	0.114(0.035)	0.027(0.219)	0.115(0.033)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.448(0.003)$ BP test is not rejected with $p = 0.083$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.151(0.032)$ BP test is rejected with $p = 4.813e - 09$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.965(0.977)$			
7	r_{ij}^{SO}	0.021(0.012)	0.028(0.012)	-0.030(0.034)	-	0.051(0.018)	0.055(0.019)	0.048(0.066)	0.053(0.018)
	p_{ij}	-2.127(5.110)	-2.751(5.224)	-4.701(20.760)	-	5.022(3.077)	5.163(3.244)	4.437(13.962)	5.026(3.102)
	l_{ij}	0.458(0.097)	0.499(0.100)	-0.014(0.374)	-	0.147(0.049)	0.147(0.057)	0.195(0.135)	0.151(0.050)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.332(0.001)$ BP test is not rejected with $p = 0.478$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.588(0.032)$ BP test isn't rejected with $p = 0.140$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.989(0.916)$			
8	r_{ij}^{SO}	0.056(0.013)	0.054(0.015)	0.070(0.042)	0.055(0.013)	-0.005(0.017)	0.003(0.019)	-0.042(0.033)	-
	p_{ij}	-0.265(3.237)	-0.760(3.330)	-3.388(17.460)	-0.306(3.239)	2.184(1.891)	1.914(2.053)	-0.814(3.218)	-
	l_{ij}	0.214(0.062)	0.235(0.063)	-0.266(0.366)	0.217(0.062)	0.132(0.029)	0.152(0.031)	-0.064(0.065)	-
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.372(0.006)$ BP test is rejected with $p = 0.009$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected with $p = 0.504(0.071)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.631(0.000)$ BP test isn't rejected with $p = 0.439$			
9	r_{ij}^{SO}	0.053(0.011)	0.055(0.011)	0.053(0.048)	-	0.045(0.022)	0.040(0.023)	0.079(0.080)	0.044(0.022)
	p_{ij}	4.627(5.144)	4.361(5.271)	17.898(23.913)	-	5.014(2.520)	4.520(2.693)	7.270(12.736)	4.872(2.539)
	l_{ij}	0.266(0.083)	0.300(0.086)	-0.224(0.228)	-	0.101(0.042)	0.109(0.049)	0.130(0.167)	0.103(0.043)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.548(0.001)$ BP test isn't rejected with $p = 0.559$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.573(0.016)$ BP test isn't rejected with $p = 0.117$ Hausman test of FE(BE) vs RE is rejected with $p = 0.946(0.927)$			
10	r_{ij}^{SO}	0.027(0.009)	0.026(0.010)	0.059(0.052)	0.026(0.009)	0.055(0.018)	0.049(0.020)	0.102(0.068)	0.055(0.018)
	p_{ij}	5.384(4.222)	4.721(4.299)	23.382(34.521)	5.087(4.225)	0.234(1.325)	-0.432(1.373)	6.594(6.101)	0.055(0.0189)
	l_{ij}	0.381(0.069)	0.395(0.070)	0.249(0.494)	0.389(0.069)	0.095(0.026)	0.028(0.020)	0.055(0.123)	0.136(1.328)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.156(0.010)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p = 0.85(0.81)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.23(3.75e - 12)$ BP test is rejected with $p = 3.75e - 12$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't/is rejected : $p = 0.20(0.05)$			
11	r_{ij}^{SO}	0.077(0.011)	0.073(0.011)	0.010(0.178)	0.076(0.011)	0.036(0.014)	0.027(0.016)	0.102(0.065)	0.031(0.015)
	p_{ij}	0.402(2.668)	-0.326(2.679)	42.982(55.349)	0.178(2.657)	1.687(1.052)	1.829(1.054)	-1.861(9.189)	1.740(1.038)
	l_{ij}	0.232(0.056)	0.248(0.058)	0.226(0.417)	0.235(0.057)	0.075(0.020)	0.070(0.020)	0.085(0.133)	0.072(0.020)
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.180(0.007)$ BP test is rejected with $p = 0.000$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p = 0.363(0.201)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.020(0.066)$ BP test is rejected with $p < 2.2e - 16$ Hausman test of FE(BE) vs RE is not rejected : $p = 0.774(0.912)$			
12	r_{ij}^{SO}	0.047(0.010)	0.049(0.010)	0.048(0.010)	0.048(0.010)	0.070(0.016)	0.078(0.025)	0.064(0.015)	-
	p_{ij}	2.405(5.404)	1.825(5.387)	2.173(5.354)	2.173(5.354)	1.337(1.352)	1.592(1.405)	-5.381(3.997)	-
	l_{ij}	0.627(0.116)	0.690(0.119)	0.659(0.116)	0.659(0.116)	0.052(0.027)	0.076(0.030)	-0.094(0.044)	-
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.112(0.009)$ BP test is rejected with $p = 0.002$ Hausman test of FE(BE) vs RE isn't rejected : $p = 0.533(0.671)$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.547(0.001)$ BP test is rejected with $p = 0.013$			
13	r_{ij}^{SO}	3.1e-02(7.74e-03)	0.030(0.008)	0.032(0.015)	-	0.047(0.015)	0.044(0.016)	0.067(0.026)	-
	p_{ij}	8.34e+00(7.50e+00)	8.896(7.814)	8.537(31.654)	-	2.324(2.004)	2.463(2.086)	-1.924(6.477)	-
	l_{ij}	2.70e-03(1.32e-01)	-0.012(0.138)	0.237(0.494)	-	0.077(0.032)	0.083(0.034)	-0.027(0.079)	-
		F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.938(0.000)$ BP test isn't rejected with $p = 0.271$				F -test of FE(BE) isn't/is rejected with $p = 0.968(0.000)$ BP test is rejected with $p = 0.147$			

Tableau 6.5 – Prévisions hors-échantillon (2013) basées sur un échantillon de 8 campagnes agricoles (2005-2012) pour l’orge de printemps et l’orge d’hiver : *qualité d’ajustement*

silo	Orge de printemps						Orge d’hiver					
	R^2		MAE		RMSE		R^2		MAE		RMSE	
	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS
1	.95	.40	68.76	62.42	93.54	119.46	.84	.67	501.43	251.82	682.66	366.69
2	.92	.57	98.47	213.43	122.32	256.37	.25	.67	367.80	251.82	560.27	366.69
3	.93	.96	2.49	8.14	3.26	10.21	.70	.50	138.47	111.82	228.56	213.80
4	.60	.53	83.76	54.97	120.06	70.57	.69	.57	308.13	231.80	366.12	301.06
5	.55	.75	161.81	200.14	185.50	208.17	.67	.63	358.62	107.46	435.44	156.40
6	.78	.39	106.30	59.58	116.72	73.36	.93	.82	122.41	109.03	168.81	151.93
7	.76	.52	104.19	119.20	124.88	151.66	.82	.63	370.62	199.31	446.07	281.66
8	.22	.67	70.19	26.58	76.21	29.73	.27	.55	132.58	119.94	150.15	136.99
9	.62	.44	87.09	156.54	92.96	161.95	.13	.80	206.63	235.21	279.25	346.47
10	.72	.64	52.92	116.22	74.02	135.45	.76	.71	209.91	96.93	244.00	140.78
11	.72	.30	52.92	49.71	74.02	65.01	.18	.74	92.20	130.30	114.88	177.23
12	.16	.72	96.68	83.42	111.49	100.69	.13	.81	267.05	167.48	379.17	297.22
13	.65	.72	86.47	70.77	126.09	110.64	.94	.59	291.96	257.69	424.26	455.70

Reste à présent à comparer la capacité de prévision des modèles de panel ainsi établis avec la régression multivariée par splines adaptative.

6.4.2 Prévisions et validation

Comparons la capacité de prévision des modèles candidats basés sur les données de panel déterminés dans la sous-section précédente sur une campagne agricole hors-échantillon, *i.e.* celle correspondante à la saison de récolte 2013. Il s’agit de 52 panels, un pour chaque silo de stockage et pour chacune des 4 sous-familles de céréales (orge d’hiver, orge de printemps, blé d’hiver, colza).

Évaluons donc l’efficacité de ces méthodes par l’intermédiaire de trois indicateurs :

- ❑ *le coefficient de corrélation (R^2)* : détermine la corrélation linéaire entre les prévisions et les observations réelles ;
- ❑ *l’erreur moyenne quadratique (RMSE)* : mesure l’écart de prédiction par rapport à l’observation réelle, calculée en tant que racine carrée de l’écart quadratique moyen ;
- ❑ *l’erreur absolue moyenne (MAE)* : représente l’écart moyen des prédictions par rapport aux observations réelles, dénotant ainsi la magnitude moyenne des erreurs dans l’ensemble des prévisions.

Les tableaux 6.6 et 6.5 donnent les statistiques sur la performance de prévision de livraisons journalières pour la campagne agricole 2013, du modèle MARS et du modèle le plus adapté basé sur données de panel sélectionné antérieurement (*cf.* sous-section 6.4.1). Ni la méthode multivariée par splines adaptatives ni les modèles basés sur données de panel ne représente le comportement de livraison des agriculteurs adéquatement pour tous les silos et pour toutes les sous-familles en même temps. En guise d’exemple, le modèle basé sur données de panel capture mieux le comportement des agriculteurs et fournit des prévisions plus précises que MARS pour les Π_9^{wb} , Π_4^r , Π_2^{wb} , Π_7^{wb} , Π_9^{sb} conformément aux trois indicateurs R^2 , MAE et RMSE. En revanche, la sélection et l’élagage des fonctions de base rend MARS particulièrement puissantes pour les Π_8^{wb} , Π_{12}^{wb} , Π_{12}^{sb} , etc.

Tableau 6.6 – Prévisions hors-échantillon (2013) basées sur un échantillon de 8 campagnes agricoles (2005-2012) pour le blé d’hiver et colza : *qualité d’ajustement*

silo	Blé d’hiver						Colza					
	R^2		MAE		RMSE		R^2		MAE		RMSE	
	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS	PD	MARS
1	.29	.78	448.06	467.70	781.96	904.36	.52	.69	204.07	126.95	252.46	151.81
2	.11	.50	239.52	142.36	374.29	257.57	.22	.67	173.60	251.61	253.30	312.06
3	.66	.75	164.78	111.67	197.05	172.43	.10	.61	38.65	30.34	54.16	51.14
4	.20	.49	362.56	320.70	440.15	390.94	.96	.55	73.74	87.53	91.19	129.02
5	.37	.55	378.37	235.40	434.76	301.33	.31	.87	99.18	71.74	117.92	97.92
6	.46	.57	214.89	236.14	290.55	315.56	.16	.75	123.49	150.13	156.20	176.38
7	.20	0.69	304.51	160.57	377.58	212.91	.43	.81	181.93	149.62	219.56	190.14
8	.17	.58	231.19	168.16	325.88	253.83	.34	.75	67.22	66.89	91.54	89.97
9	.35	.42	272.56	312.41	343.46	347.69	.26	.51	65.84	50.48	79.19	72.55
10	.16	.81	265.05	201.08	397.05	359.56	.54	.72	83.95	68.65	97.27	76.72
11	.16	.74	265.05	234.22	397.05	381.37	.53	.58	83.95	62.26	97.27	73.64
12	.25	.78	364.32	210.87	441.63	264.83	.90	.80	46.32	28.68	54.59	37.24
13	.57	.60	626.63	521.38	831.22	689.33	.72	.80	79.89	51.96	123.94	77.36

Bien que la méthodologie proposée fournit une analyse pertinente et des résultats prédictifs rassurants, ces derniers peuvent encore être améliorés en utilisant des données météorologiques plus rigoureuses, notamment pour les silos 2, 7, 9, 10, 11, qui sont relativement éloignés de la station météorologique Troyes Barberey (1002). De toute façon, tel que le montre les expérimentations numériques, la conjugaison entre ces deux approches permet de décrire plus fidèlement les quantités journalières livrées dans chaque silo de stockage pendant une campagne agricole, en s’appuyant bien entendu sur des données historiques.

6.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons étudié la dynamique journalière de livraisons de céréales effectuées par un ensemble d’agriculteurs. Cet examen a été réalisé à l’aide de modèles basées sur données de panel et la régression multivariée par splines adaptatives, tout en tenant compte de la répercussion des conditions météorologiques sur le déroulement de la moisson. Nombreuses expérimentations numériques ont été également menées en se basant sur de données issues de l’étude de cas visé par cette thèse. Celles-ci montrent des résultats fiables quant aux prévisions des quantités de livraison journalières dans les silos de stockage, facilitant ainsi l’organisation opérationnelle de réception des céréales pendant la période de récolte.

Planification des opérations de vidage des silos de collecte

“ Cultiver les meilleurs produits en veillant chaque jour à la protection des cultures et à la transmission de bonnes pratiques pour protéger la santé des utilisateurs et de l’environnement, tel est l’enjeu de l’agriculture de demain dont la SCARA se veut être un bel ambassadeur...”

Jean-Pierre FLOGNY, Président, SCARA

”

Sommaire

7.1 Introduction	93
7.2 Description du problème et modélisation mathématique	95
7.3 Méthodologie de résolution	99
7.3.1 Incertitude sur les coefficients de la fonction-objectif	99
7.3.2 Incertitude sur les coefficients du second membre	100
7.3.3 Approche combinée	101
7.4 Résultats numériques	102
7.5 Conclusions et perspectives	103

7.1 Introduction

L’activité de la récolte proprement dite, implique la participation de deux partenaires, les producteurs et les organismes de stockage, qui sont en interaction mais qui gèrent et organisent indépendamment les opérations qui les concernent. Mettant en lumière les préoccupations des premiers, orientées en outre vers les services des agriculteurs, dans ce chapitre nous nous intéressons alors à la planification des opérations de vidage des silos de collecte. Incontestablement, la logistique et le transport sont des composantes primordiales à tout système agricole, tel que stipulé par [Ahumada and Villalobos \(2009\)](#).

En vue d’assurer une réception fluide et un stockage adéquat auprès des silos de collecte un transfert régulier (journalier) des céréales vers les silos d’expédition, est organisé (*cf.* chapitre 3). À ce propos, il

convient d'apporter une précision : par un stockage approprié, non seulement la mise en stock à l'abri des facteurs d'altérations est sous-entendu, mais également un allotement des céréales selon plusieurs critères (compatibilité variétale, taux de protéines, humidité, pourcentage des grains germés, etc.) ou respect de tout autre cahiers de charges spécifiques.

Sans disposer d'aucune information exacte relative aux modes d'organisation et aux débits des chantiers agricoles, la coopérative se veut toutefois emphatique et réactive aux services des agriculteurs. C'est le moment donc d'exploiter les contributions apportées dans le chapitre précédant en matière de caractérisation chiffrée et compréhension du comportement de livraison des agriculteurs pendant la période de récolte.

En absence de loi de probabilité décrivant les quantités livrées, nous nous contentons dans ce chapitre de les avoir représentées sous forme d'intervalles continus, fournis par des techniques statistiques de prévisions (*cf.* chapitre 6). Cela nous a permis de faire appel à la programmation robuste par intervalles, pour guider ainsi la planification journalière de vidage des silos de collecte, en anticipant les besoins quant à la capacité de stockage et aux possibilités d'allotement.

Introduite par [Dantzig \(1955\)](#), l'optimisation robuste s'intéresse à la résolution des problèmes entachés d'incertitudes, sans pour autant recourir aux modèles probabilistes. Dans la littérature, ce paradigme de programmation s'articule essentiellement autour des problèmes comportant l'incertitude : soit, dans les coefficients de la fonction-objectif, soit dans les coefficients qui interviennent dans les contraintes.

Quant à la première famille de problèmes, la démarche réside dans la recherche d'une solution qualifiée de robuste avant la révélation des paramètres incertains, qui varient dans un domaine d'incertitudes connus à l'avance ([Averbakh, 2000, 2001](#)). Pour y parvenir, deux critères sont couramment utilisés dans la littérature, à savoir : le critère du *pire cas* (robustesse absolue) et le critère du *meilleur cas*. Appliquer le critère du pire cas revient à s'intéresser à une solution optimisant sa pire valeur. Ce critère convient aux décideurs conservateurs, qui évitent d'endosser tout risque portant sur l'évaluation du problème. *A contrario*, appliquer le critère du meilleur cas consiste à rechercher une solution qui optimise sa meilleure valeur ; critère fournissant la valeur la plus optimiste de la fonction-objectif.

Lorsque l'incertitude pèse sur les coefficients qui interviennent dans les contraintes, *i.e.* dans les membres droit et/ou gauche, le concept de robustesse prend alors un autre sens. En effet, être robuste revient à garantir sa faisabilité pour toutes les manifestations d'incertitudes pouvant se produire. Spécialement dédiées à traiter le cas particulier où l'incertitude porte exclusivement sur la matrice technologique, trois approches sont devenues particulièrement populaires : l'approche de [Soyster \(1973\)](#), l'approche de [Ben-Tal and Nemirovski \(1999\)](#), et celle de [Bertsimas and Sim \(2004\)](#). En revanche, le cas où l'incertitude porte uniquement sur les coefficients du second membre est souvent abordé *via* la théorie de la dualité ([Minoux, 2009; Gabrel et al., 2008, 2010](#)).

Sans ignorer l'attractivité qu'elle présente en matière d'exigence sur la complétude d'information en entrées, à notre connaissance, la programmation par intervalles a fait l'objet d'un nombre assez modeste d'applications industrielles, notamment dans le secteur de l'agriculture (*cf.* chapitre 2). Par souci de justice toutefois, il convient de citer les problèmes spécifiques ayant été traités *via* la programmation par intervalles dans un contexte de recherche, à savoir, le problème de plus court chemin ([Yaman et al., 2001; Kasperski and Zielinski, 2006](#)), le problème de l'arbre couvrant minimum ([Yu, 1996](#)), le problème du sac-à-dos ([Taniguchi et al., 2008](#)), problème d'allocation de ressources ([Averbakh and Lebedev, 2004](#)), problème de voyageur de commerce ([Montemanni et al., 2007](#)), etc.

Avec ce chapitre, nous avons l'intention principalement, de résoudre le problème de planification des opérations de vidage des silos de collecte, de contribuer au transfert des avancées théoriques récemment obtenues dans le cadre de l'optimisation robuste par intervalles, vers le domaine de l'agriculture. Dans cette perspective, le reste de ce chapitre s'articule en quatre sections. Après avoir posé le contexte du problème sous étude dans ce chapitre, la section 7.2 procède à sa modélisation mathématique sous la forme d'un programme d'optimisation robuste avec intervalles, où l'incertitude affecte à la fois les coefficients de la fonction-objectif et ceux du second membre des contraintes. En appliquant les critères du pire cas et du meilleur cas, la section 7.3 met l'incertitude sur la fonction-objectif (évaluation) *versus* l'incertitude sur le second membre (faisabilité). Les expérimentations numériques menées dans ce sens sont commentées dans la section 7.4. Enfin, dans la dernière section, nous concluons ce chapitre en soulevant l'intérêt et les limitations de l'approche proposée.

7.2 Description du problème et modélisation mathématique

Tel que mentionné précédemment lors des chapitres précédents, en vue d'assurer une réception fluide et adéquate auprès des silos de collecte pendant la période de récolte, un transfert vers les silos d'expédition est régulièrement organisé. Ceci doit se faire d'une manière à :

- assurer une capacité suffisante de stockage afin de pouvoir collecter toutes les livraisons des agriculteurs ;
- permettre de répondre convenablement aux critères qualitatifs imposés lors du stockage (sécurité sanitaire des céréales, allotement, cahiers de charges spécifiques, ségrégation adaptée aux débouchés commerciaux, etc.) ;
- respecter un ensemble de contraintes en matière de traçabilité, réglementations exigées par le code du travail, etc.

Pour ce faire, une flotte hétérogène et limitée de K véhicules, préalablement dimensionnée, est dédiée à vider régulièrement les silos de collecte b ($b \in B$), dont les cellules c ($c \in C_b$) se remplissent rapidement au fur et à mesure que la récolte avance. Désignons alors par g_k la capacité de chaque véhicule k ($k \in K$). Une fois les capacités suffisantes de stockage sont assurées dans chaque silo de collecte pour répondre à l'impératif du lendemain, la flotte de véhicules peut alors continuer le processus de vidage des cellules en vue d'anticiper les futurs besoins en matière de demande de livraison. Sachant que les capacités et le nombre de cellules des silos de collecte sont assez limités par rapport à la gamme de variétés et quantité journalière totale à satisfaire, soit donc p une période relativement courte, permettant de gérer convenablement l'opération de vidage.

À la recherche de solutions pertinentes et opérationnelles, il nous semble assez raisonnable de plaider pour une approche période par période, nous permettant de prendre ainsi d'attitude pour le lendemain en fonction des niveaux de stocks constatés dans les silos de collecte au moment de la prise de décision. À notre sens, celle-ci est mieux adaptée qu'une approche multi-périodique, compte tenu en outre de la forte variabilité météorologique. Plus précisément, il s'agit de planifier période par période (jour par jour), les multiples trajets nécessaires afin de garantir une capacité suffisante de stockage w_{cbv} dans les cellules c ($c \in C_b$) de chaque silo de collecte b ($b \in B$), capable de recevoir adéquatement les quantités livrées de différentes variétés v ($v \in V$). En relation avec les quantités prévues pour être livrées pendant les p périodes de temps suivantes et les niveaux de stocks s_{cbv} dans les cellules c ($c \in C_b$) des silos de collecte

b ($b \in B$), cette planification doit se faire d'une façon à minimiser les quantités potentielles non-stockées de manière appropriée, pour répondre ainsi le plus fidèlement possible aux exigences prescrites vis-à-vis de l'opération de stockage.

Tableau 7.1 – Planification des opérations de vidage des silos de collecte : *notations*

Paramètres :	
$v, v \in V$	variété de céréales
$b, b \in B$	silo de collecte
$e, e \in E$	silo d'expédition
$k, k \in K$	véhicule
$c, c \in C_b$	cellule du silo de collecte b
$p, p \in P$	horizon de temps court
Données déterministes :	
s_{cbv}	niveau de stocks en variété v dans la cellule c du silo de collecte b au début de la période de planification
u_{cb}	capacité de la cellule c du silo de collecte b
h_{cbv}	prend la valeur 1, s'il est possible de stocker dans la cellule c la variété v , et 0 sinon
$r_{v'v''}$	prend la valeur 1, si les variétés v' et v'' sont compatibles, et 0 sinon
g_k	capacité du véhicule k
t_{eb}	durée du trajet entre le silo d'expédition e et le silo de collecte b
t_l	temps de chargement
t_u	temps de déchargement
T	temps de travail quotidien
M	grande constante (e.g. supérieure ou égale à u_{cb})
Données incertaines :	
q_{bv}^\pm	quantité de variété v prévue pour être livrée dans le silo de collecte b au cours de la période de temps suivante
\tilde{q}_{bv}^\pm	quantité de variété v prévue pour être livrée dans le silo de collecte b au cours de p périodes de temps suivantes
Variables :	
y_{cb}	quantité de la cellule c provenant du silo de collecte b à transférer
z_{cbv}	prend la valeur 1, si la cellule c du silo de collecte b contient la variété v
w_{cbv}	capacité disponible pour stocker la variété v de la cellule c du silo satellite b
x_{cbe}^k	nombre d'allers-retours entre les silos b et e nécessaire pour vider la quantité y_{cb} provenant de la cellule c du silo b
f_{vb}	quantité excédentaire de variété v du silo b , calculée par rapport aux niveaux de stocks du silo b au moment de la prise de décision et la quantité \tilde{q}_{bv}^\pm

Dans la plupart des cas, sauf contrainte particulière imposée sur certaines variétés, les agriculteurs livrent leurs récoltes à l'unité de stockage la plus proche. Les quantités quotidiennes à réceptionner par chaque silo ne sont connues qu'après leurs arrivées. À la faveur de l'analyse statistique prévisionnelle de l'évolution au cours de temps des livraisons journalières auprès de chaque silo (cf. chapitre 6), il est possible de disposer quand même d'une information approximative sous forme d'intervalles. Il convient de noter à ce titre, que la répercussion de la météo sur le processus d'avancement de l'activité de récolte et le comportement des agriculteurs est implicitement prise en compte par les techniques statistiques de prévision.

Dénotons donc, sous forme d'intervalle, par q_{bv}^\pm la quantité journalière de variété v prévue pour être livrée dans le silo de collecte b le lendemain, où $q_{bv}^\pm = [q_{bv}^-, q_{bv}^+]$, $q_{bv}^- \leq q_{bv}^+$. Considérons de plus, \tilde{q}_{bv}^\pm la quantité

totale de variété v ($v \in V$) prévue pour être livrée dans les p périodes de temps suivantes dans le silo de collecte b ($b \in B$), où $\tilde{q}_{bv}^{\pm} = [\tilde{q}_{bv}^{-}, \tilde{q}_{bv}^{+}]$, $\tilde{q}_{bv}^{-} \leq \tilde{q}_{bv}^{+}$

Avant de procéder à la modélisation du problème, il convient de préciser les suppositions suivantes :

- Chaque véhicule peut transporter des biens céréaliers provenant uniquement d'une seule cellule d'un silo de collecte par trajet.
- Le point de départ d'un véhicule est considéré le premier silo de collecte figurant dans le planning journalier de transfert. Ainsi, le trajet journalier multiple d'un véhicule k commence au silo de collecte b^* (point de départ) et fini au silo d'expédition e^* (dépôt), où b^* ($b^* \in B$) représente le premier silo de collecte et e^* ($e^* \in E$) le dernier silo d'expédition dans le planning de transfert du véhicule k ($k \in K$).
- Les régimes de vitesse sont considérés donnés et respectés par tous les chauffeurs de véhicules.
- Aucun embouteillage n'est à craindre.
- Un chauffeur par véhicule par jour, le régime de travail en 3x8 n'est donc pas autorisé.
- Réglementée par le code de travail, la durée légale du travail est limitée à T (heures) par jour.
- La distance non-symétrique est considérée entre tous les paires de points origine-destination. Le temps t_{eb} , nécessaire pour effectuer le trajet entre un silo d'expédition e ($e \in E$) et un silo de collecte b ($b \in B$) n'est donc pas équivalent à t_{be} .
- Le temps de chargement t_l et respectivement celui de déchargement t_u est considéré donné et égale pour tous les silos d'expédition et ceux de collecte.

Ces conditions étant posées, considérons la variable de décision entière x_{cbe}^k , qui indique le nombre d'allers-retours à effectuer par le véhicule k entre le silo de collecte b et le silo d'expédition e , nécessaire pour vider la quantité y_{cb} provenant de la cellule c du silo de collecte b . Au même titre, dénotons par w_{cbv} la variable réelle de décision, qui représente la capacité disponible de la cellule c du silo de collecte b , pouvant réceptionner la variété v au respect de la compatibilité *cellule-variété* prescrite h_{cv} et dans la limite de sa capacité totale u_{cb} .

En vue de tenir compte des aspects de différenciation lors du stockage (ségrégation et/ou allotement des céréales, relation *nature-espèce* et /ou *cellule-variété*), les valeurs suivantes sont également supposées connues outre les données précédentes. Ainsi, h_{cbv} exprime la compatibilité *cellule-variété*, en prenant la valeur 1 si la cellule c du silo de collecte b est autorisée à réceptionner la variété v et 0, sinon. Dans le même esprit, la compatibilité inter-variétale est définie à travers la donnée $r_{v'v''}$ qui vaut 1, si les variétés v' et v'' sont compatibles et 0, sinon. Deux variétés sont considérées compatibles, si elles peuvent être stockées dans une même cellule.

La variable positive de décision f_{vb} désigne la quantité excédentaire de variété v (*i.e.* qui ne peut pas être stockée convenablement dans le silo b), déterminée en fonction de la quantité de variété v prévue pour être livrée dans le silo de collecte b au cours de p périodes de temps suivantes \tilde{q}_{bv}^{\pm} , et la capacité totale disponible en variété v dans le silo b au moment de la prise de décision, $\sum_{c \in C_b} w_{cbv}$.

Visant prioritairement à garantir un stockage conforme au lendemain, nous nous proposons également de guider le processus de vidage de façon à prévenir les éventuelles quantités excédentaires susceptibles d'être exposées à des risques d'un stockage inapproprié auprès de l'ensemble de silos de collecte. En considérant

les notations et les variables introduites ci-dessus (cf. tableau 7.1), un programme linéaire par intervalles est formalisé à cet égard, tel que suit :

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{b \in B} f_{vb} \quad (7.1)$$

sous contraintes :

$$f_{vb} \geq \tilde{q}_{bv}^{\pm} - \sum_{c \in C_b} w_{cbv} \quad \forall v, \forall b \quad (7.2)$$

$$\sum_{c \in C_b} w_{cbv} \geq q_{bv}^{\pm} \quad \forall v, \forall b \quad (7.3)$$

$$u_{cb} - \sum_{v \in V} s_{cbv} + y_{cb} = \sum_{v \in V} w_{cbv} \quad \forall b, \forall c \quad (7.4)$$

$$w_{cbv} \leq M \cdot h_{cbv} \quad \forall v, \forall b, \forall c \quad (7.5)$$

$$1 + w_{cbv} > z_{cbv} \quad \forall v, \forall b, \forall c \quad (7.6)$$

$$w_{cbv} \leq M \cdot z_{cbv} \quad \forall v, \forall b, \forall c \quad (7.7)$$

$$z_{cbv'} + z_{cbv''} \leq r_{v'v''} + 1 \quad \forall v', v'' (v' \neq v''), \forall b, \forall c \quad (7.8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{e \in E} x_{cbe}^k \cdot g_k \geq y_{cb} \quad \forall c, \forall b \quad (7.9)$$

$$\sum_{c \in C_b} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E} (t_{eb} + t_{be} + t_l + t_u) \cdot x_{cbe}^k \leq T \quad \forall k \quad (7.10)$$

$$w_{cbv} \geq 0 \quad \forall c, \forall b, \forall v \quad (7.11)$$

$$z_{cbv} \in \{0, 1\} \quad \forall c, \forall b, \forall v \quad (7.12)$$

$$y_{cb} \geq 0 \quad \forall b, \forall c, \forall k \quad (7.13)$$

$$x_{cbe}^k \in \mathbb{N} \quad \forall e, \forall b, \forall c \quad (7.14)$$

$$f_{vb} \geq 0 \quad \forall v, \forall b \quad (7.15)$$

Les quantités excédentaires correspondant à chaque type de variété sont calculées par les contraintes (7.2) pour chaque silo de collecte, en tenant compte des niveaux des stocks au moment de la prise de décision et de la quantité totale prévue pour être livrée pendant les p périodes de temps suivantes. Les contraintes (7.3) privilégient le stockage conforme aux quantités susceptibles d'être livrées le lendemain dans chaque silo de collecte. Les contraintes d'équilibre de stocks dans chaque cellule de l'ensemble de silos de collecte sont exprimées par (7.4). Les contraintes (7.5) supervisent le respect de la compatibilité *cellule-variété*. De la même manière, les contraintes (7.6) et (7.7) forcent chaque variable binaire z_{cbv} à valoir 1, si la cellule c du silo de collecte b est réservée pour collecter la variété v le lendemain, et 0 sinon. Ces variables sont prescrites au regard de la compatibilité inter-variétale du spectre de variétés préconisées d'être mises dans la même cellule, ceci étant exigée *via* les contraintes (7.8).

Afin de garantir une capacité suffisante de stockage dans chaque silo de collecte b , les contraintes (7.9) déclenchent un transfert de céréales vers les silos d'expédition e , en utilisant la flotte de véhicules K . Les contraintes (7.10) limitent à T unité de temps (heures) la durée du travail de chaque chauffeur, donc de chaque véhicule. La fonction-objectif (7.1) quant à elle, cherche à minimiser les quantités excédentaires susceptibles d'être exposées à des risques d'un stockage inapproprié auprès de l'ensemble de silos de collecte.

Dans le programme linéaire par intervalles (7.1)-(7.15) présenté ci-dessous, l'incertitude affecte à la fois les coefficients de la fonction-objectif et ceux du membre droit des contraintes. Autrement dit, l'incertitude porte en même temps sur l'évaluation et la faisabilité d'une solution, dimensions du problème souvent traitées individuellement sous forme de cas spéciaux (Hladík, 2009; Gabrel et al., 2008). En ce qui nous concerne, nous tenterons, dans la prochaine section, d'étudier la robustesse des solutions selon les critères du pire cas et celui du meilleur cas appliqués conjointement par rapport à l'incertitude portant sur la fonction-objectif et le second membre des contraintes du problème.

7.3 Méthodologie de résolution

Confrontés au programme linéaire par intervalles (7.1)-(7.15) avec l'incertitude affectant les coefficients de la fonction-objectif et ceux du second membre, nous proposons d'appliquer successivement les critères du pire cas et celui du meilleur cas sur l'évaluation et la faisabilité du problème afin de les combiner ultérieurement.

Avant de procéder à l'établissement de versions d'optimisation robuste, une définition s'impose. Par souci de clarté, il convient de noter qu'une *configuration* (ou scénario) est définie comme étant une spécification d'une valeur unique de l'intervalle pour chaque paramètre incertain du problème, fixée indépendamment les unes des autres (Gabrel et al., 2008).

7.3.1 Incertitude sur les coefficients de la fonction-objectif

Soit X l'ensemble admissible de solutions réalisables du programme (7.1)-(7.15). Appliquer le critère du pire cas (du meilleur cas) consiste à évaluer une solution x ($x \in X$) en retenant la configuration qui lui sera la plus défavorable (favorable). Le critère du pire cas est considéré comme étant un critère de référence en optimisation robuste, car son application sur un problème par intervalles permet d'obtenir une solution résistant aux mieux aux variations d'incertitudes dans leurs domaines de définition, une telle solution étant qualifiée de robuste (Gabrel et al., 2010). De surcroît, l'application du critère du meilleur cas permet de décrire la plage de valeurs possibles de la fonction-objectif face aux réalisations d'incertitude, donnant ainsi un aperçu sur les risques potentiels à prendre dans le cas où la solution optimiste est retenue *versus* celle pessimiste (Chinneck and Ramadan, 2000).

Soit donc x ($x \in X$) une solution réalisable du programme (7.1)-(7.15). Sa valeur selon le critère du pire cas (meilleur cas), notée $f_{\text{worst}}(x)$ ($f_{\text{best}}(x)$) est définie comme suit :

$$f_{\text{worst}}(x) = \max_{\tilde{q}^- \leq \tilde{q} \leq \tilde{q}^+} \sum_{v \in V} \sum_{b \in B} f_{vb} \quad (7.16)$$

$$f_{\text{best}}(x) = \min_{\tilde{q}^- \leq \tilde{q} \leq \tilde{q}^+} \sum_{v \in V} \sum_{b \in B} f_{vb} \quad (7.17)$$

où $\tilde{q}^\pm = (\tilde{q}_{bv}^\pm)_{b \in B, v \in V}$.

La valeur $f_{\text{worst}}(x)$ est une garantie pour la solution x , du moment que quel que soit la configuration C des coefficients incertains de la fonction-objectif, $f_C(x)$ sera inférieure ou égale à $f_{\text{worst}}(x)$. C'est donc

dans cette optique que $f_{\text{worst}}(x)$ représente une mesure de robustesse. Or, $f_{\text{best}}(x)$ constitue le plafond de la fonction-objectif qu'il est possible d'atteindre face aux incertitudes. En mesurant l'écart entre le pire et le meilleur cas, il est ainsi possible au décideur de se repérer dans la prise de décision dans un contexte incertain.

Ainsi, lorsque l'incertitude pèse sur les coefficients de la fonction-objectif, la recherche d'une solution $x_{\text{worst}}(x_{\text{best}})$ optimisant le critère du pire cas (meilleur cas) revient à résoudre le programme (7.3)-(7.15), qui optimise la fonction $f_{\text{worst}}(x)$ ($f_{\text{best}}(x)$). En autres termes, il s'agit de déterminer la solution $x_{\text{worst}}(x_{\text{best}})$, qui minimise $f_{\text{worst}}(x)$ ($f_{\text{best}}(x)$), où $x \in X$:

$$f_{\text{worst}}(x_{\text{worst}}) = \min_{x \in X} f_{\text{worst}}(x) \quad (7.18)$$

$$f_{\text{best}}(x_{\text{best}}) = \min_{x \in X} f_{\text{best}}(x) \quad (7.19)$$

En matière de complexité, il convient de rappeler les résultats théoriques suivants :

Proposition 7.1. (Averbakh, 2001) *L'application du critère du pire cas sur un programme linéaire, dont les coefficients de la fonction-objectif sont incertains et définis par intervalles, est un problème polynomial.*

Proposition 7.2. (Gabrel et al., 2008) *Lorsque les variables de décisions sont libres (sans contrainte de signe), l'application du critère du meilleur cas sur un programme linéaire, dont les coefficients de la fonction-objectif sont incertains et définis par intervalles, est un problème \mathcal{NP} -difficile.*

En vertu des propositions susmentionnées, les versions robustes du programme linéaire par intervalles (7.1)-(7.15) obtenues suite à l'application du critère du pire et celui du meilleur cas sur l'évaluation, sont donc des problèmes polynomiaux.

7.3.2 Incertitude sur les coefficients du second membre

Comme nous l'avons présenté dans la sous-section antérieure, deux critères sont communément considérés : le critère du pire cas et celui de meilleur cas, lorsque l'incertitude affecte les coefficients de la fonction-objectif d'un programme linéaire par intervalles. D'autre part, quand les incertitudes portent sur le second membre des contraintes, les critères classiques ne peuvent pas être directement appliqués pour se prononcer sur l'évaluation d'un tel programme.

Dans ce dernier cas, l'incertitude affecte la faisabilité d'une solution. Une configuration q ($q^- \leq q \leq q^+$, $q^\pm = (q_{bv}^\pm)_{b \in B, v \in V}$) est alors considérée comme étant défavorable à une solution x donnée, lorsque x n'appartient pas à l'ensemble admissible du programme (7.1)-(7.15) obtenu quand le vecteur d'intervalles q^\pm est instancié par une configuration q .

Soit P^q le programme linéaire par intervalles (7.1)-(7.15) lorsque le membre gauche des contraintes est configuré par q , q variant dans l'intervalle q^\pm : $q^- \leq q \leq q^+$, $q^\pm = (q_{bv}^\pm)_{b \in B, v \in V}$. De plus, dénotons par $\vartheta(P^q)$ la valeur optimale du programme P^q . Ainsi, dans le cas où l'incertitude porte sur les coefficients du second membre, la recherche d'une solution optimisant le critère du pire cas, et respectivement du meilleur cas, revient à résoudre le programme, noté WORST et respectivement BEST, tels que formalisés ci-après :

$$\text{BEST} : \begin{cases} \min \vartheta(P^q) \\ \text{s.t } q^- \leq q \leq q^+ \end{cases} \quad (7.20)$$

$$\text{WORST} : \begin{cases} \max \vartheta(P^q) \\ \text{s.t } q^- \leq q \leq q^+ \end{cases} \quad (7.21)$$

Compte tenu de sa faisabilité quelle que soit la configuration du second membre des contraintes, la solution optimale du programme WORST est qualifiée en tant que robuste. En revanche, le programme BEST fournit la meilleure solution admissible, permettant ainsi de mesurer l'incidence sur la fonction-objectif vis-à-vis de l'incertitude portant sur les coefficients du second membre des contraintes.

Abordons maintenant la complexité des versions déterministes du programme (7.1)-(7.15), WORST et BEST, à travers les propositions énoncées ci-dessus :

Proposition 7.3. (Gabrel et al., 2008) *L'application du critère du pire cas sur un programme linéaire, dont les coefficients du second membre des contraintes avec inégalités sont incertains et définis par intervalles, est un problème polynomial.*

Proposition 7.4. (Gabrel et al., 2008) *L'application du critère du meilleur cas sur un programme linéaire, dont les coefficients du second membre des contraintes sont incertains et définis par intervalles, est un problème polynomial.*

Dans le programme sous étude dans ce chapitre, les contraintes affectées par l'incertitude sont exclusivement des inégalités. Ainsi, en vertu des proposition 7.3 et 7.4, l'application des critères du pire cas et du meilleur cas sur sa faisabilité, débouche sur des versions robustes polynomialement solvables, le calcul du pire optimum devenant \mathcal{NP} -difficile que pour les programmes linéaires avec contraintes d'égalité.

7.3.3 Approche combinée

Afin de résoudre le programme (7.1)-(7.15) affecté par l'incertitude dans la fonction-objectif et simultanément dans le second membre des contraintes, nous proposons de combiner successivement l'application des critères du pire cas et celui du meilleur cas quant à son évaluation, et respectivement à sa faisabilité. Soit donc X^{BEST} (X^{WORST}) l'ensemble des solutions optimales de BEST (WORST). À la lumière des résultats présentés au cours des sous-sections 7.3.2 et 7.3.2, quatre versions linéaires déterministes peuvent être construites, permettant ainsi l'étude comparative de l'évaluation et de la faisabilité du programme par intervalles (7.1)-(7.15) :

$$f_{\text{worst}}^{\text{WORST}} = \min_{x \in X^{\text{WORST}}} f_{\text{worst}}(x) \quad (7.22)$$

$$f_{\text{worst}}^{\text{BEST}} = \min_{x \in X^{\text{BEST}}} f_{\text{worst}}(x) \quad (7.23)$$

$$f_{\text{best}}^{\text{WORST}} = \min_{x \in X^{\text{WORST}}} f_{\text{best}}(x) \quad (7.24)$$

$$f_{\text{best}}^{\text{BEST}} = \min_{x \in X^{\text{BEST}}} f_{\text{best}}(x) \quad (7.25)$$

Sur le plan méthodologique, les versions robustes (7.22) (7.23) (7.24) et (7.25) nous amènent à résoudre des programmes linéaires bien connus dans un environnement déterministe. En contrepartie sur le plan décisionnel, ces versions robustes révèlent ainsi les variations et les incidences sur les valeurs du problème à travers le prisme de deux dimensions de celui-ci : son évaluation et sa faisabilité.

7.4 Résultats numériques

Le modèle (7.1)-(7.15) analysé dans ce chapitre, a été conçu et proposé pour guider la planification des opérations de vidage des silos de collecte au profit d'un stockage conforme des céréales lors de la période de récolte. Le programme linéaire par intervalles en cause a été étudié selon les critères du pire et celui du meilleur cas *via* les versions linéaires déterministes (7.22), (7.23), (7.24) et (7.25). Ces dernières ont été implémentées en utilisant le langage de programmation C++ et résolues ultérieurement par le solveur d'optimisation ILOG CPLEX (version 12.6.0), pour des instances comportant : plus de 30 types de variétés distinctes, 3 silos d'expédition et 11 silos de collecte avec un nombre de cellules variant entre 10 et 15, dont les capacités sont comprises entre 200 et 800 tonnes par cellule. Les expérimentations numériques ont été effectuées sur une machine Intel(R) Core(TM) i7-2720QM CPU à 2.20GHz.

En général, la période de récolte s'étend approximativement sur un mois, voire un mois et demi. Pendant cette période, les quantités prévues pour être livrées dans les silos de collecte sont estimées par des techniques statistiques de prévisions (*cf.* chapitre 6), permettant de prendre en compte les prévisions météorologiques et le comportement des agricultures tel qu'il se manifestait lors des campagnes agricoles antérieures. En raison de petits écarts entre les dates de maturité physiologiques des céréales (compris entre 1 et 10 jours) et tenant compte des rendements des chantiers agricoles, la valeur de p a été empiriquement fixée à 3 périodes de temps (jours).

Dans les lignes qui suivent, examinons les Fig. 7.1 et Fig. 7.2, qui illustrent les résultats correspondants à la mauvaise et à la meilleure incidence sur la fonction-objectif, lorsque l'incertitude portant sur les coefficients du membre gauche varie dans son domaine de définition, dans les configurations de pire cas et respectivement du meilleur cas, appliquées sur l'évaluation du programme (7.1)-(7.15). Plus particulièrement, la Fig. 7.1 reporte les résultats des versions linéaires déterministes (7.22) et (7.23), tandis que la Fig. 7.2 représente les résultats des (7.22) et (7.23).

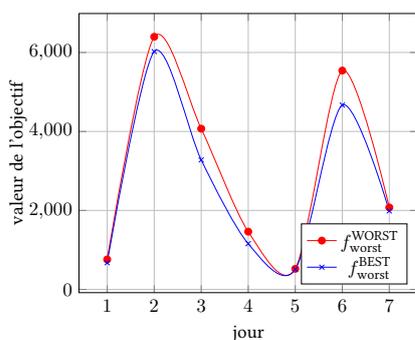


FIGURE 7.1 – (7.22) vs. (7.23)

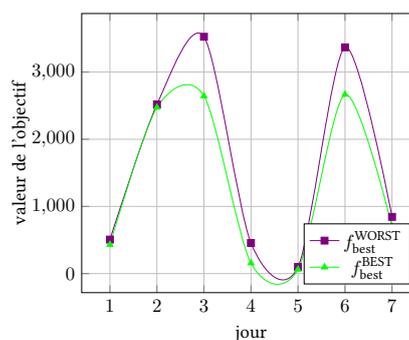


FIGURE 7.2 – (7.23) vs. (7.24)

Des écarts significatifs entre les valeurs de la fonction-objectif obtenues par les approches (7.22)-(7.23) et (7.24)-(7.25) correspondant aux périodes de temps 2, 3 et 6, signalent d'éventuelles indisponibilités des silos de collecte pour ces périodes-là. Il se peut qu'un large éventail de variétés soient prévues pour être livrées durant les périodes 2, 3 et 6, alors qu'elles ne pourraient pas être stockées convenablement. Dans ces situations, le décideur doit donc être assez prudent dans la prise de décision et essayer de s'orienter en fonction de la conjoncture terrain (*e.g.* en dépendance de la gamme de variétés à collecter et/ou d'al-lotement et de ségrégation à effectuer). Au contraire, le décideur pourra éventuellement opter pour les

solutions fournies par (7.22) pour les périodes 1, 4 et 5, car des écarts négligeables sont enregistrés pour ces périodes-là, facilitant ainsi sa prise de décisions. La modélisation des incertitudes doit donc traduire le plus fidèlement possible ces aléas afin de se rapprocher de la réalité et de mieux répondre à l'objectif visé.

Telles que le montrent les expérimentations numériques, les approches (7.22), (7.23), (7.24) et (7.25) permettent de faire une étude comparative sur l'évaluation et la faisabilité des solutions du problème et ainsi de guider le décideur à prendre les décisions lui semblant les plus pertinentes possibles dans cet univers incertain.

7.5 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre nous nous sommes plus spécifiquement focalisés sur l'activité de stockage, en intervenant dans la planification des opérations de vidage des silos de collecte. Pour ce faire, une approche période par période a été proposée *via* un programme linéaire par intervalles. Pour ce dernier, une étude comparative a été menée visant l'évaluation et la faisabilité des solutions proposées face aux incertitudes portant simultanément sur les coefficients de la fonction-objectif et le membre gauche des contraintes.

Dans la continuité du travail présenté dans ce chapitre, plusieurs voies d'améliorations s'imposent, telles que :

- *sur le plan applicatif* : améliorer la modélisation de la compatibilité variétale, en introduisant par exemple des notes pour l'appréciation qualitative des lots ségrégués de différentes variétés dans les cellules de silos de collecte. Sachant que le nombre de cellules dans les silos de collecte est insuffisant pour séparer les céréales selon le double critère *variété/qualité*, il serait intéressant de rajouter une contrainte requérant une certaine note (taux) par rapport à la ségrégation des céréales à autoriser dans les cellules des silos de collecte.
- *sur le plan méthodologique* : parmi les critères classiques du pire cas et celui du meilleur cas, l'étude de robustesse selon d'autres critères (de regret maximum, etc.) permettra aux décideurs de faire une analyse comparative de robustesse plus fine, en choisissant la solution leur semblant la plus pertinente. À ce propos, il existe d'autres critères définis récemment, tel que *bw-robustesse* proposé par Roy (2010), etc.

Reconfiguration de la chaîne logistique agricole

“ Pouvoir échanger et réunir les forces pour mieux se comprendre et travailler ensemble plus efficacement. C’est à cela que sert l’animation au quotidien et c’est vital pour notre avenir...”

Guillaume VIGNEAU, Responsable Développement Adhérents, SCARA

”

Sommaire

8.1 Introduction	105
8.2 Couplage <i>simulation optimisation</i>	106
8.3 Vers une approche mutualisée	110
8.4 Analyse de scénarios prospectifs	112
8.5 Résultats numériques	112
8.5.1 Optimisation du système simulé	112
8.5.2 Simulation et optimisation	113
8.5.3 Analyse de performance	114
8.6 Conclusions et perspectives	115

8.1 Introduction

C’est la performance de la chaîne logistique agricole, le moteur du progrès recherché par tous les maillons, qui représente le fil conducteur de la démarche de projection dans l’avenir à court et à long terme. Dans la quête de celle-ci, nous nous proposons de combiner les outils d’aide à la décision présentés au cours de cette thèse, pour faire front commun aux challenges imposés à la filière de production agricole.

Nous nous lançons ainsi dans la recherche des meilleurs paramétrages et (re)-configurations de la chaîne logistique agricole actuelle dans toute son intégralité. Pour ce faire, un ensemble d’indicateurs de performance sera dressé pour refléter le triple objectif d’un pilotage efficace de la chaîne : **(i)** d’amélioration des niveaux de prestations de service, **(ii)** de réduction des coûts, et **(iii)** de création de valeur ajoutée pour

tous les acteurs (Carbone and Meunier, 2006). Garder une vue d'ensemble est donc important, tant pour la mutualisation logistique, qui apparaît comme une opportunité de création de valeur économique, que pour la restructuration locale, qui peut avoir des incidences considérables sur la conduite de la chaîne entière.

Ce chapitre est entièrement consacré à discuter les potentiels leviers d'amélioration de performance de la chaîne logistique dans sa globalité. Débutant par une courte discussion des termes d'usage du concept *simulation optimisation*, la section 8.2 combine les modules de simulation et d'optimisation développés au cours de ce travail. Ensuite, la section 8.3 soulève la question d'une politique de stockage alternative reposant sur le transfert direct des flux de céréales des champs vers les silos d'expédition. Sachant que le coût d'exploitation des silos de collecte est assez important par rapport aux coûts liés aux opérations logistiques de transfert d'un silo de collecte vers un silo d'expédition, l'impact de fermeture/ouverture d'un ou plusieurs implantations physiques de stockage intermédiaire *via* des scénarios prospectifs est évalué dans la section 8.4. En capitalisant toutes ces voies d'amélioration possibles de la chaîne logistique agricole dans son intégralité, la section 8.5 aborde la mise en œuvre expérimentale, (i) en insistant sur différents types de couplage *simulation optimisation* dans les sous-sections 8.5.1 et 8.5.2, (ii) et en cherchant les meilleures reconfigurations possibles de la chaîne *via* l'analyse de plusieurs indicateurs de performance dans la sous-section 8.5.3. Finalement, ce chapitre est clôturé en section 8.6 par une conclusion synthétisant les réflexions ci-évoquées sur la reconfiguration compétitive de la chaîne logistique agricole entière.

8.2 Couplage *simulation optimisation*

L'idée de couplage de l'approche de simulation et celle de l'optimisation n'est pas récente. D'une part, étant à la recherche de configurations efficaces de systèmes de production/distribution/etc., les praticiens font fréquemment recours à l'optimisation pour paramétrer ces systèmes le mieux possible. D'autre part, c'est d'habitude la communauté scientifique qui utilise la simulation dans le cadre de la programmation stochastique, lui permettant de palper par là les incertitudes. Ainsi, la même expression de *simulation optimisation* (*simulation optimization*, en anglais) peut être rencontrée dans la littérature pour désigner différents usages possibles.

Pour éviter toute ambiguïté et confusion, clarifions les multiples connotations méthodologiques du concept de couplage *simulation-optimisation* discernées dans la littérature (Swisher et al., 2004; Fu, 2002) :

- **optimisation pour simulation** : également connu sous le nom d'*optimisation via simulation* (Andradóttir, 2007), ce type de couplage consiste à optimiser en effet des systèmes simulés, dont la démarche est illustrée dans la Fig. 8.1. Plus spécifiquement, la simulation sert à évaluer successivement le comportement d'un système paramétré en conformité avec les solutions proposées par l'approche d'optimisation, guidant ainsi la recherche vers de meilleures solutions.

Les principales approches d'optimisation des systèmes simulés sont les suivantes : algorithmes évolutionnistes et génétiques, recherche tabou et dispersée, recuit simulé et techniques basées sur les réseaux de neurones artificiels (Melouk et al., 2014; Chan and Schruben, 2008; Paris et al., 2001; Pierreval and Tautou, 1997; Pierreval and Paris, 2003). Vouloir paramétrer plus soigneusement les systèmes complexes, la communauté scientifique continue de s'investir dans ce sujet, en s'intéressant notamment au développement des algorithmes d'optimisation dédiés (Bachelet and Yon, 2007), multi-objectifs (Person et al., 2008), non-linéaires (Kleijnen et al., 2010; Angün et al., 2009), etc.

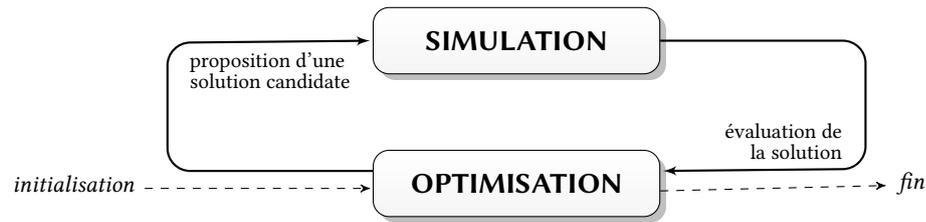


FIGURE 8.1 – Optimisation via simulation (Fu, 2002; Kleijnen and Wan, 2007)

D'ailleurs, capable de configurer les systèmes simulés, le module d'optimisation ainsi fonctionnant (cf. Fig. 8.1), est intégré en option dans de nombreux logiciels de simulation, en tant qu'*add-on*, e.g. : AutoStat (AutoMod), OptQuest (Arena, Crystall Ball, AnyLogic, etc.), OPTIMIZ (Simul8), SimRunner (ProModel), Optimizer (WITNESS), etc.

- **simulation pour optimisation** : dans le cadre de la programmation stochastique, la simulation est souvent utilisée **(i)** soit pour générer de scénarios en concordance avec des distributions de probabilités données (cf. Fig. 8.2), **(ii)** soit pour reproduire différentes configurations d'un système prêt aux incertitudes, donnant ainsi un contexte de validation des solutions trouvées par l'optimisation (cf. chapitre 5).

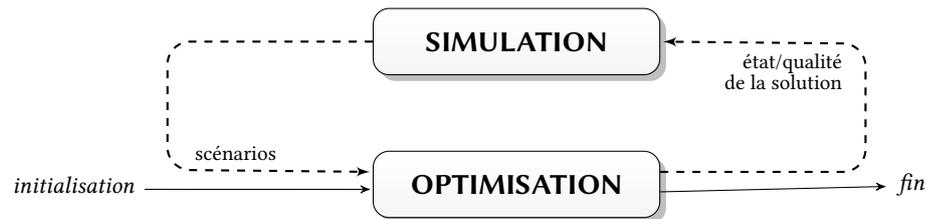


FIGURE 8.2 – Simulation pour optimisation (Fu, 2002)

Outre l'optimisation d'un critère de type espérance mathématique, l'approche fondée sur des scénarios représentant les aléas, est largement appliquée dans la résolution d'un modèle probabiliste. Que cela soit pour la programmation stochastique à deux/plusieurs étapes ou la programmation stochastique dynamique, la simulation sert à générer des scénarios en fonction de l'état de résolution relatif aux solutions trouvées par l'optimisation, ou bien, conformément à un niveau de qualité/fiabilité prescrit (Shapiro et al., 2009; Kall and Wallace, 1994).

Dans le deuxième cas **(ii)**, la simulation s'avère un moyen expérimental vraisemblable pour tester et valider les solutions trouvées par l'optimisation stochastique, en fournissant des métriques de performance pour mesurer la qualité de ces solutions et les valeurs de la fonction-objectif associées, face à un nombre important de répliques.

- **simulation et optimisation** : comme nous l'avons déjà souligné dans le chapitre 3, la simulation n'est pas capable de prendre de décisions optimales au sein même du système simulé. À notre connaissance, peu de travaux sont consacrés pour pallier à cet inconvénient de la simulation. Dans ce sens, il convient de citer Vamanan et al. (2004), qui proposent d'imbriquer l'approche d'optimisation dans le cadre d'un système simulé pour guider la prise de décisions lors de son pilotage. S'intéressant à la gestion d'une chaîne d'approvisionnement, ces auteurs ont réussi à coupler les deux logiciels : ARENA, pour simuler le fonctionnement de la chaîne, et respectivement, CPLEX, pour optimiser un problème logistique et de stockage.

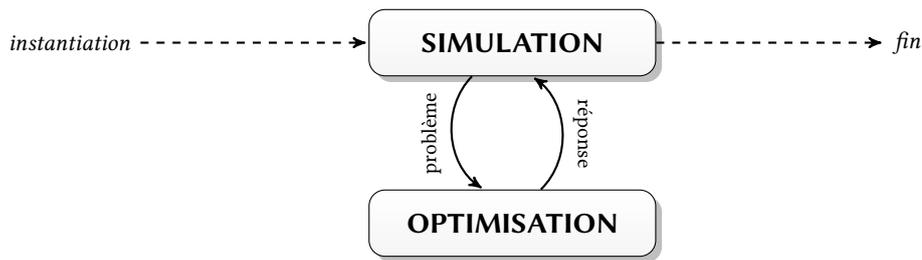


FIGURE 8.3 – Simulation et optimisation

La Fig. 8.3 schématise ce type de couplage de simulation *et* optimisation, qui repose sur l'appel du module d'optimisation par la simulation, lorsqu'un problème de prise de décision s'impose, ce dernier ne pouvant pas être décrit par une liste de règles/solutions prédéfinies.

L'optimisation pour simulation étant dédiée à configurer efficacement un système simulé, elle intervient ainsi convenablement dans des problèmes de décision stratégique ou tactique. En revanche, l'optimisation *via* simulation ne semble pas appropriée à résoudre des problèmes de décision opérationnels qui, en outre sont très fréquents dans des systèmes simulés à l'échelle d'applications réelles. Bien évidemment, certains problèmes opérationnels peuvent être résolus avec OptQuest, mais ceci présente un inconvénient majeur de nécessiter des temps de calcul considérables : en règle générale, la résolution des problèmes opérationnels ne dépend que d'un sous-ensemble réduit de données et de paramètres du système simulé ; l'optimisation avec OptQuest n'est pas ainsi justifiée, car elle implique l'exécution d'un nombre de réplifications du système simulé entier.

À la lumière des considérations mentionnées auparavant, améliorons donc les possibilités du modèle de simulation présenté dans le chapitre 3, en réalisant :

- un *couplage de simulation et optimisation* : pour gérer convenablement les risques de dégradation de la qualité des céréales et pour planifier efficacement les opérations de vidage des silos de collecte (cf. chapitres 5 et 7), il est possible d'intégrer les approches d'optimisation dans le cadre du modèle de simulation tel qu'expliqué par [Vamanan et al. \(2004\)](#).

D'ailleurs, en ce qui concerne le problème de gestion des risques de dégradation des céréales, il n'est pas approprié de le résoudre avec OptQuest, car ce dernier résout uniquement des modèles ne comportant pas explicitement d'incertitudes. Les données stochastiques étant instanciées par la simulation, ceci nous oblige à configurer les disponibilités des jours de récolte pour tout l'horizon de la collecte des céréales dont la longueur n'est constatée qu'après la fin de son achèvement. D'autre part, OptQuest optimise à la fois un seul modèle (et une seule fonction-objectif) du modèle simulé, et n'est pas capable d'aborder le problème de planification des opérations de vidage *via* une approche période par période.

- une *optimisation du système simulé* : afin de paramétrer raisonnablement le réseau des silos de stockage, optimisons le système agricole simulé, dont la modélisation a été présentée au chapitre 3. Pour ce faire, ré-considerons les flux de céréales récoltés f , ($f \in F$) et les silos de stockage s , ($s \in S$), où l'ensemble E représente les silos d'expédition et B les silos de collecte ($E \cup B = S$). Soit x_{fs} la variable binaire de décision, qui prend la valeur 1 si le flux f est livré au silo s , et 0 sinon. La variable y_s vaut 1 si au moins un flux de céréales est livré au silo s et 0, sinon. De plus, la variable t_{eb} dénote la quantité acheminée du silo de collecte b vers le silo d'expédition e .

Tableau 8.1 – Optimisation logistique du système simulé : notations

Paramètres :	
$f, (f = 1, \dots, F)$	flux de céréales
$e, (e = 1, \dots, E)$	silo d'expédition
$b, (b = 1, \dots, B)$	silo de collecte
$s, (s = 1, \dots, S)$	silo de stockage
Données :	
D_{fs}	distance entre l'origine (parcelle) du flux f et le silo de stockage s
D_{eb}	distance entre le silo d'expédition e et le silo de collecte b
Q_f	quantité du flux de céréales f
M	grande constante (supérieure à $\sum_{f=1}^F Q_f$)
Variables :	
x_{fs}	1, si le flux de céréales f est livré au silo s , et 0 sinon
y_s	1, si le silo s est utilisé, et 0 sinon
t_{eb}	quantité transférée du silo de collecte b vers le silo d'expédition e

En utilisant les notations ci-dessous introduites (cf. tableau 8.1), un problème mixte en nombres entiers peut être formalisé comme suit :

$$\min \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S x_{fs} \cdot D_{fs} \cdot Q_f + \sum_{e=1}^E \sum_{b=1}^B t_{eb} \cdot D_{eb} \quad (8.1)$$

$$\sum_{s=1}^S x_{fs} = 1, \quad \forall f \quad (8.2)$$

$$\sum_{f=1}^F x_{fs} \leq M \cdot y_s, \quad \forall s \quad (8.3)$$

$$\sum_{f=1}^F x_{fs} \geq y_s, \quad \forall s \quad (8.4)$$

$$\sum_{f=1}^F Q_f \cdot x_{fb} = \sum_{e=1}^E t_{eb}, \quad \forall b \quad (8.5)$$

$$\sum_{b=1}^B t_{eb} \leq M \cdot y_e, \quad \forall e \quad (8.6)$$

$$t_{eb} \geq 0, \quad \forall e, \forall b \quad (8.7)$$

$$x_{fs}, y_s \in \{0, 1\}, \quad \forall f, \forall s \quad (8.8)$$

Puisque chaque flux de céréales récoltées doit être livré à un silo de stockage, les contraintes (8.2) sont imposées. Les contraintes (8.3)- (8.4) forcent la variable y_s à prendre la valeur 1 si au moins un flux de céréales est livrée au silo de stockage s , et 0 sinon. Sachant que les quantités livrées au silo de collecte b doivent être transférées à un silo d'expédition, les contraintes (8.5) sont prescrites. Enfin, les contraintes (8.6) signifient qu'aucun transfert n'est effectué à un silo d'expédition non-utilisé.

La fonction-objectif (8.1) vise à minimiser la quantité-distance totale parcourue entre les parcelles et les silos d'expédition. Il convient de mentionner que ce genre de problème ne peut être résolu que

par une approche d'optimisation *via* simulation, ce qui permet d'optimiser des systèmes complexes ne pouvant pas être modélisés analytiquement.

Ainsi, le problème d'optimisation (8.1)-(8.6) associé au système agricole simulé, peut être efficacement résolu avec OptQuest. Étant nécessaire, la simulation du système agricole permet de vérifier et d'évaluer les solutions proposées par OptQuest (*i.e.* le déroulement de l'activité de récolte pour un ensemble de silos de stockage ouverts) et également de guider le processus d'optimisation.

8.3 Vers une approche mutualisée

En vue de l'évolution du matériel dans les exploitations agricoles et afin d'anticiper les incidences quant à la réception dans les silos de stockage, imaginons un autre type de prestation de service permettant de rentabiliser le potentiel de récolte des producteurs, tel que décrit ci-après et illustré dans la Fig. 8.4 :

- permettre et organiser un stockage en bout de champs (stockage tampon) ;
- fermer les silos de collecte et mettre les silos d'expédition à la disposition des agriculteurs 24 heures par jour ;
- synchroniser les activités de récolte dans les champs et celles de réception aux silos d'expédition ;
- assurer un processus continu de récolte, sans imposer des contraintes liées à la fermeture des silos d'expédition ;
- s'organiser ensemble (coopérative et agriculteurs) pour le transport des céréales collectées entre les champs et les silos d'expédition.

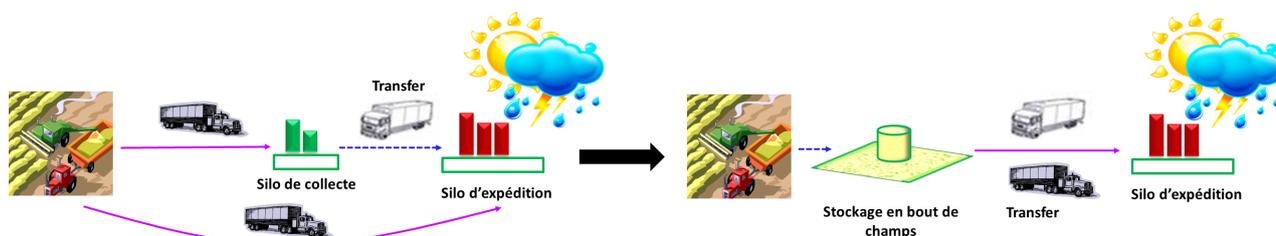


FIGURE 8.4 – Vers une approche mutualisée

Avant de procéder à la modélisation de cette configuration alternative de la chaîne logistique actuelle, il convient de noter les considérations suivantes :

- la capacité de stockage en bout de champs est supposée non-limitée ;
- nous ne nous intéressons pas aux techniques de reprise de céréales aux champs ;
- aucune contrainte liée à la sécurité de stockage et à la protection de céréales en bout de champs n'est imposée. En revanche, le stockage par temps de pluie est interdit, donc le transfert est anticipé en cas de météo défavorable.

La Fig. 8.5 schématise la reconfiguration de la chaîne logistique actuelle, dont le modèle de simulation a été élaboré dans le chapitre 3. Ainsi, aucun silo de collecte n'est ouvert à la réception de céréales, le

stockage tampon aux champs étant en revanche organisé tout en tenant compte de l'aspect météorologique. Outre les moyens de transport des agriculteurs, la flotte de véhicules de la coopérative n'ayant plus à vider les silos de collecte, est également dédiée au transfert des céréales récoltées aux champs directement vers les silos d'expédition. Conformément aux débits des fosses des silos d'expédition, les opérations de transport et celle de réception sont synchronisées, évitant ainsi la création de files d'attente aux silos d'expédition.

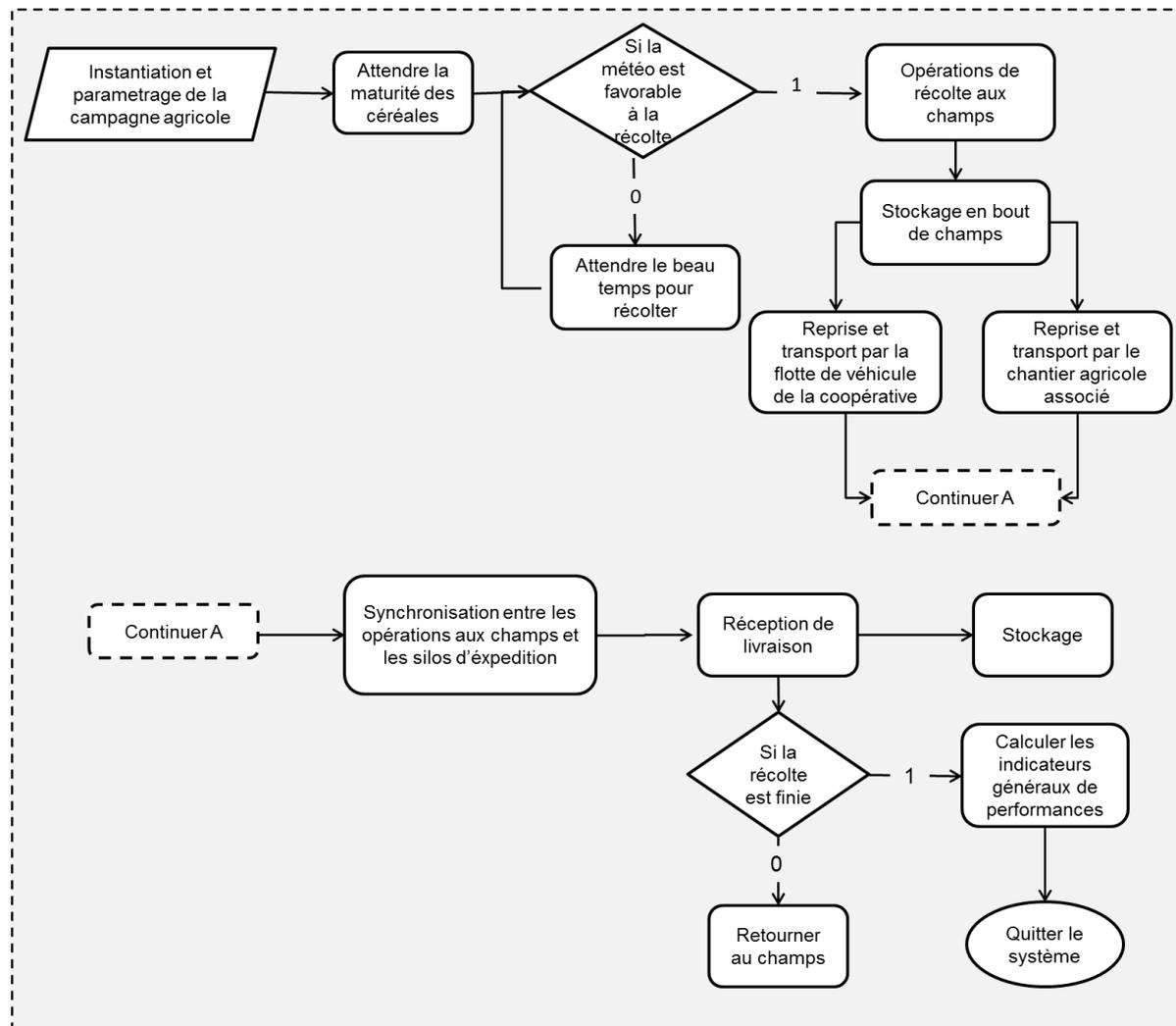


FIGURE 8.5 – Chaîne logistique alternative : transfert direct entre les champs et les silos d'expédition

La fédération d'une façon plus industrielle des efforts et des ressources de la coopérative et des agriculteurs, permet ainsi de procurer d'avantages pour les deux parties prenantes :

- ❑ la coopérative peut ainsi ré-organiser le réseau des sites de stockages et assurer une réception plus efficace ;
- ❑ la politique de stockage ci-évoquée permet aux agriculteurs d'exploiter correctement leurs parcs de matériel, sans avoir besoin d'arrêter le travail des moissonneuses-batteuses (fait qui a des incidences

économiques importantes), sauf en cas de pluies ;

- ❑ la mutualisation logistique peut représenter donc une opportunité de rationalisation des ressources impliquées dans le pilotage de flux de céréales entre les champs et les silos d'expédition.

8.4 Analyse de scénarios prospectifs

Outre l'étude d'une nouvelle politique de stockage présentée dans la section précédente, intégrons plusieurs scénarios, qui correspondent à la fermeture/ouverture d'un ou plusieurs implantations physiques de stockage intermédiaire.

Pour l'évaluation quantitative de différents scénarios, nous avons élaboré un ensemble de plusieurs indicateurs de performance, présentés ci-dessous :

- ❑ coût total d'exploitation des silos satellites (coût fixe d'utilisation des silos satellites et coût variable de stockage) ;
- ❑ quantité totale transférée des silos satellites vers les silos d'expédition et le coût associé ;
- ❑ quantité maximale journalière reçue par chaque silo satellite/d'expédition ;
- ❑ nombre d'heures ouvrées par jour aux silos, nécessaire pour recevoir la récolte journalière des agriculteurs ;
- ❑ risques de dégradation des céréales exprimés par l'écart entre la date de récolte proprement-dite et la date de maturité physiologique ;
- ❑ distance maximale d'une implantation de stockage pour chaque parcelle.

8.5 Résultats numériques

Tel que fait dans le chapitre 3, les expérimentations numériques reportées dans cette section correspondent à une campagne agricole effectuée dans une zone géographique gérée par la coopérative concernée, comportant : un silo d'expédition, 3 silos de collecte.

8.5.1 Optimisation du système simulé

L'*add-on* OptQuest est un module complémentaire disponible en option avec Arena, étant un produit OptTek (Laguna and Marti, 2002). Le moteur OptQuest intègre dans une seule méthode composée de méta-heuristiques (la recherche tabou, les réseaux neuronaux et la recherche dispersée), de programmation mathématique et de réseau neuronal pour repérer la recherche de solutions optimales aux problèmes d'optimisation des systèmes simulés, cette méthode n'étant pas divulguée pour des raisons commerciales.

Ainsi, en définissant le problème (8.1)-(8.6) du système agricole simulé avec OptQuest, celui-ci est capable de fournir un ensemble de solutions trouvées, comme présenté dans le tableau 8.2.

Tableau 8.2 – OptQuest : optimisation *via* simulation

valeur de l'objectif	statut de la solution
84097118.6	faisable
80588075.4	faisable
79547329.6	faisable
76289663.4	faisable
196134878.2	infaisable
150722949.8	infaisable
161348461.6	infaisable
123529274	infaisable
83048288.8	infaisable
131186979.4	infaisable
111722239.2	infaisable
97960300.4	infaisable
185327921.4	infaisable
127044239.6	infaisable
198021911.6	infaisable
340418863.4	infaisable

8.5.2 Simulation et optimisation

Entre outre, le logiciel Arena interagit avec les technologies Microsoft, et plus spécifiquement celui-ci peut intégrer : (i) ActiveX Automation, qui fournit des contrôles au sein et au travers d'applications Windows ; et, (ii) Visual Basic for Applications, qui permet d'étendre les fonctionnalités Arena ou de rajouter des algorithmes personnalisés à modéliser en SIMAN (Altiok and Melamed, 2007). En effet, Visual Basic for Applications (VBA) est une implémentation du langage de programmation Microsoft Visual Basic qui est intégrée dans toutes les applications de Microsoft Office, permettant l'échange de données et de commandes entre celles-ci.

À partir d'Arena, l'environnement de programmation VBA est accessible, donnant la possibilité de déclencher des applications externes soit *via* le passage des entités par un bloc spécifique VBA, soit lors d'événements prédéfinis au niveau du modèle de simulation. À l'instar de Vamanan et al. (2004), nous avons profité de cette opportunité pour intégrer les modèles d'optimisation présentés dans les chapitres 5 et 7 dans le cadre du module de simulation correspondant à la chaîne logistique agricole.

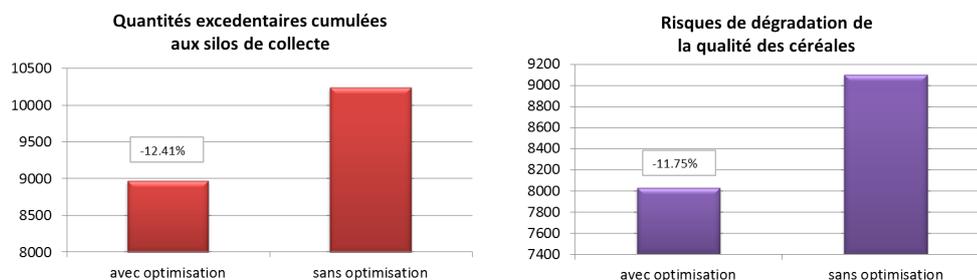


FIGURE 8.6 – Expérimentation numérique : simulation et optimisation

La figure 8.6 illustre les valeurs relatives aux quantités excédentaires cumulées aux silos de collecte (figure à gauche) et les risques de dégradation de qualité des céréales (calculés en tant que l'écart entre la date de maturité physiologique et celle de la récolte) enregistrées à la fin du pilotage de la chaîne logistique agricole dans les deux cas : avec et respectivement sans l'intégration de l'optimisation (figure à droite).

8.5.3 Analyse de performance

Analysons plusieurs scénarios de la chaîne logistique agricole présentée dans le chapitre 3 correspondant à la fermeture des silos de collecte *via* les trois plus importants indicateurs de performance quant à leur incidence économique : **(i)** coût total d'exploitation des silos de stockage, **(ii)** risques cumulés de dégradation de la qualité des céréales ainsi que **(iii)** la distance-quantité totale parcourue par les flux de céréales à partir de champs vers les silos d'expédition.

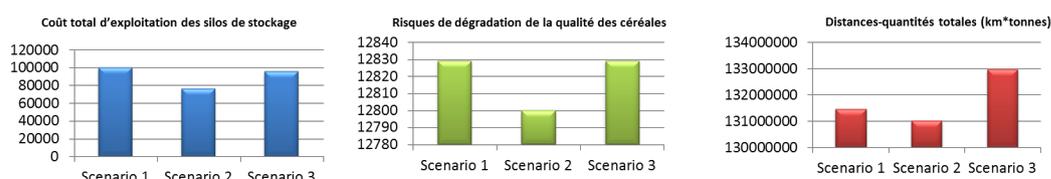


FIGURE 8.7 – Expérimentation numérique : analyse de scénarios correspondant à la fermeture d'un seul silo de collecte

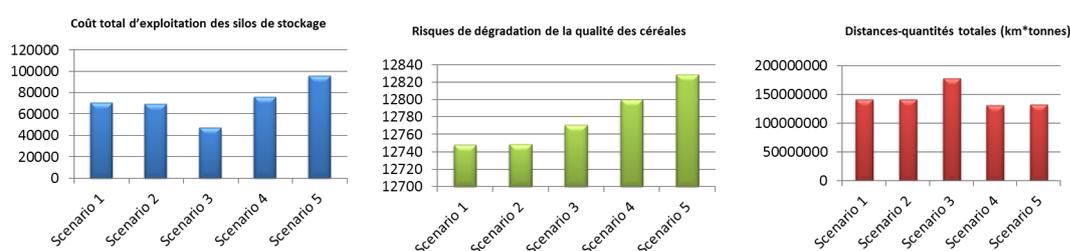


FIGURE 8.8 – Expérimentation numérique : analyse de scénarios correspondant à la fermeture de deux silos de collecte

À titre d'exemple, nous avons reporté dans les Fig. 8.7 et 8.8 les valeurs de ces indicateurs de performance de la chaîne logistique lors de la fermeture d'un seul silo et respectivement de deux silos de collecte. Ce genre d'analyses aide à la gestion stratégique du réseau des silos de stockage et à son éventuelle modernisation et/ou restructuration.

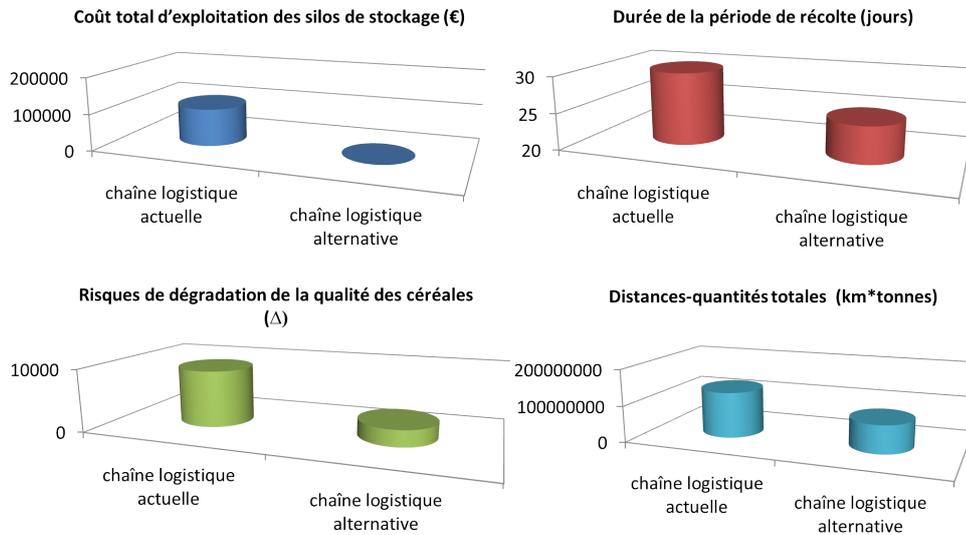


FIGURE 8.9 – Expérimentation numérique : chaîne logistique actuelle vs. chaîne logistique alternative

En utilisant les mêmes métriques de performance, analysons la Fig. 8.9, qui met en comparaison la chaîne logistique agricole dans son état actuel avec une reconfiguration alternative plus industrielle. Comme le montre les résultats, le transfert direct entre les champs et les silos d'expédition implique des risques de dégradation plus faibles conjointement avec un horizon de récolte plus court, les chantiers agricoles n'étant désormais obligés d'arrêter la récolte au champs pendant les heures de fermeture des silos de stockage. Conditionné par la fermeture des silos de collecte, le coût total d'exploitation des silos de stockage est considérablement moins élevé dans le cadre de la chaîne alternative que dans la configuration actuelle. L'organisation collaborative du pilotage des céréales vers les silos d'expédition, entre les agriculteurs et la coopérative, permet d'éviter le passage par les silos de collecte, créant ainsi une opportunité des gains réciproques. Cette mise en perspective est nécessaire et s'inscrit dans le cadre d'une éventuelle modernisation et/ou d'une réorganisation des sites de stockage, préconisée en vue de l'évolution des parcs de matériel agricole des agriculteurs.

8.6 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre nous avons abordé certaines opportunités d'amélioration de la performance de la chaîne logistique agricole. D'une part l'approche d'optimisation suggère les meilleures décisions à prendre, d'autre part, le modèle de simulation est capable de s'adapter et représenter facilement les différentes modifications dans la configuration de la chaîne logistique. La synergie créée entre ces deux approches permet de paramétrer et éventuellement reconfigurer la chaîne logistique que cela soit au niveau stratégique ou tactique (optimisation *via* simulation), ou bien opérationnel (optimisation *et* simulation).

En revanche, le travail présenté dans ce chapitre comporte plusieurs limitations qui restent encore à surmonter, telles que :

- définir et intégrer différents types de stockage précaire ;

- ❑ décider sur les modes de reprise des céréales en bout de champs ;
- ❑ décrire le matériel nécessaire pour la menue paille et la productivité des machines dans les différents cas de météo.

De plus, le système agricole étudié dans cette thèse a été soumis aux divers amendements réalisés par l'optimisation mono-objectif, l'étude multi-critères étant effectuée *via* l'analyse de plusieurs indicateurs de performance. Or, une approche d'optimisation multi-critères pourra apporter des supports d'aide à la décision, notamment pour le problème de la gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales dans le cadre de la politique de stockage en bout de champ.

Conclusions générales

Dans un univers en pleine mutation, le secteur agricole et en particulier agro-alimentaire, se re-dessine complètement à l'heure actuelle. En ce sens, la SCARA, la coopérative agricole concernée par les travaux exposés dans cette thèse, souhaite repenser sa chaîne logistique, pour passer ainsi à une approche plus industrielle au profit de la performance de tous les acteurs impliqués dans son pilotage.

Sensibilisés et repérés par les préoccupations de la filière agro-alimentaire mises en relief par l'état de l'art réalisé dans chapitre 2, nous avons procédé à la définition et modélisation conceptuelle de la chaîne logistique actuelle de la coopérative agricole visée, à travers : **(i)** d'une étude spatiale nous permettant de concrétiser et délimiter la collectivité territoriale sous étude (*cf.* annexe A), **(ii)** d'un modèle de simulation à événements discrets reproduisant la configuration actuelle et facilitant la compréhension de la gestion d'un système d'opérations agricoles (*cf.* chapitre 3).

Une analyse profonde des besoins de l'industriel, nous a permis d'identifier plusieurs pistes d'amélioration possibles dans le pilotage de la chaîne logistique agricole, et ainsi d'y intervenir et apporter notre contribution en matière d'aide à la décision pour les problèmes suivants : gestion des risques de dégradation de la qualité des céréales face aux incertitudes météorologiques (*cf.* chapitres 4 et 5), caractérisation du comportement de livraison des agriculteurs (*cf.* chapitre 6) et planification des opérations de vidage des silos de collecte pendant la période de récolte (*cf.* chapitre 7).

À la recherche de solutions fiables dans un contexte de mise en œuvre industriel, nous avons ensuite intégré les méthodes analytiques de gestion quantitative des opérations et d'aide à la décision dans un environnement expérimental. La synergie créée par le couplage simulation-optimisation et la définition d'un ensemble d'indicateurs de performance, nous a permis d'imaginer et d'analyser plusieurs modes de collaboration, paramétrages et re-configurations de la chaîne logistique agricole, dont l'évaluation a été réalisée à travers l'étude de scénarios alternatifs (*cf.* chapitre 8).

Dans la continuité des études réalisées, il reste un travail important à mener sur les deux fronts : théorique et applicatif. Les perspectives industrielles de ce travail étant nombreuses, nous suggérons ci-après quelques grandes directions se référant aux différents aspects abordés dans le mémoire.

- ❑ **assemblage des composants d'aide à la décision** : il s'agit de développer une interface informatisée, rendant possible la communication entre les outils de décision vus au cours de cette thèse. Elle doit également permettre aux potentiels usagers de paramétrer, manipuler et obtenir des réponses au regard de la chaîne logistique agricole telle qu'elle a été présentée.
- ❑ **extension des fonctionnalités** : les travaux et les résultats exposés dans ce mémoire ne couvrent pas exhaustivement les problématiques complexes et évolutives, affectant la maîtrise conforme de

la chaîne logistique agricole. Certaines pistes d'améliorations ont été déjà relevées au cours de ce mémoire dans les sections clôturant chaque chapitre.

- ❑ **vers la mise en œuvre industrielle** : l'ambition finale de ce projet réside dans le développement d'un dispositif d'intervention et d'aide à la décision permettant de répondre aux besoins d'une gestion convenable de la chaîne logistique agricole. Pour devenir un logiciel, le système d'aide à la décision ci-présenté, éventuellement étendu, doit être traduit en un outil informatique, ce qui suppose le développement d'interfaces, les tests avec la coopérative concernée, etc. Entre autres, ce travail est en cours de réalisation.
- ❑ **insertion dans une réalité industrielle** : la mise en application des solutions proposées par l'outil d'aide à la décision comporte plusieurs étapes, telles que **(i)** attirer l'implication d'un ensemble de parties prenantes **(ii)** vérifier la rentabilité des solutions proposées sur des cas réels, et **(iii)** implémenter éventuellement les solutions retenues et évaluer leur mise en pratique.

Sur le rapport théorique, quant à lui, il serait à la fois captivant pour la communauté scientifique et utile pour les praticiens de se pencher sur :

- ❑ *la programmation stochastique et dynamique anticipative* : concevoir des méthodologies permettant de prendre en compte la dynamique temporelle dans un environnement stochastique, et de pouvoir corriger, éventuellement à moindre coût, les décisions prises avant la survenue des aléas.
- ❑ *la programmation linéaire par intervalles* : caractériser l'ensemble des solutions optimales lorsque les coefficients incertains d'un programme linéaire par intervalles varient dans leurs domaines de définition ; etc. (Hladík, 2009).
- ❑ *le couplage simulation-optimisation* : réfléchir aux nouveaux modes de couplage/collaboration simulation-optimisation dans un environnement incertain et dynamique.

Cette thèse a donné lieu à plusieurs publications dont un article de revue internationale, trois communications avec actes répertoriés dans les bases de données internationales et cinq communications avec actes non répertoriés dans les bases de données internationales. Quatre autres articles de revues internationales ont également été soumis.

Liste de publications

Articles de revues

- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014j). A quality risk management problem: case of annual crop harvest scheduling. *International Journal of Production Research*, 52(9):2682–2695.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014d). Combined simulation and optimization approach for an agricultural supply chain redesign. *International Journal of Production Economics*, pages 1–10. (soumis, janvier 2014).
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014g). Handling uncertainty in agricultural supply chain management: a state of the art. *European Journal of Operational Research*, pages 1–12. (soumis, août 2014).
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014i). A multi-step rolled forward chance-constrained model and a proactive dynamic approach for the wheat crop quality control problem. *International Journal of Production Economics*, pages 1–11. (soumis, août 2014).
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014a). Application of panel data and multivariate adaptive regression splines modellings: case of farmers' crop delivery. *Computational Statistics & Data Analysis*, pages 1–12. (soumis, août 2014).

Communications avec actes répertoriés dans les bases de données internationales

- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013b). A discrete event simulation model for harvest operations under stochastic conditions. In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on*, pages 708–713.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014h). An interval programming approach for an operational transportation planning problem. In *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, volume 442 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 117–126.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014f). A decision support system for efficient crop production supply chain management. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014*, volume 8583 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 775–790.

Communications avec actes non-répertoriés dans les bases de données internationales

- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2012a). Gestion des flux de céréales d'une coopérative agricole. In *ROADEF - 13ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, pages 1–2.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2012b). A scenario-based approach for quality risk management: case of annual crops scheduling. In *International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing (META)*, pages 1–2.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013c). Simulation et analyse des performances d'une chaîne logistique agricole. In *ROADEF - 14ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, pages 1–2.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013a). Combined simulation and optimization approach for an agricultural supply chain redesign. In *Proceeding of the 22nd International Conference on Production Research*, pages 1–10.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014b). An application of the discrete event simulation for efficient crop production supply chain. In *10th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMulation (MOSIM)*, pages 1–10, Nancy, France

Communications orales sans actes dans un congrès

- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014k). Système d'aide à la décision pour une chaîne logistique agricole performante. In *ROADEF - 15ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, Bordeaux, France.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014c). A bi-objective chance constrained programming model for efficient crop harvest scheduling. In *18th International Symposium on Inventories (ISIR)*, Budapest, Hungary.
- ❑ Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014e). Crop harvest scheduling on a rolling horizon basis : a farm-dedicated operational application. In *EURO Mini-Conference on Stochastic Programming (ECSP)*, Paris, France.

Annexes

A Étude spatialisée : système d'information géographique

L'organisation agricole étant confrontée au territoire dans son activité professionnelle et son fonctionnement, une représentation spatiale du périmètre concerné par la coopérative sous-étude peut fournir dans ce sens de nombreux éléments d'information, en mettant en relation les différentes informations géographiques disponibles. Afin de pouvoir exploiter les données géographiques de la collectivité territoriale se référant à la SCARA, un système d'information géographique a été donc créé (cf. A.1).

Pour ce faire, plusieurs données géographiques et ponctuelles ont été collectées, se rattachant aux :

- coordonnées géographiques des tous silos de stockage ;
- un ensemble d'îlots visés par la coopérative sous-étude obtenu à partir du registre parcellaire graphique (RPG) ;
- coordonnées géographiques des barycentres d'un ensemble de parcelles fournies par ATLAND¹ ;
- produits numériques entièrement dérivés de la base de données ROUTE 500®, qui à son tour provient de la Base de Données Cartographique (BD CARTO®), une des grandes bases de données géographiques initiées par l'Institut Géographique National sur le territoire français. Il a pour vocation de fournir le support relatif au transport routier. ROUTE 500® est organisé en fonction des 4 thèmes : administratif, habillage, réseau ferré, routier et infrastructure de transport. La réutilisation de ROUTE 500® est gratuite pour tous les usages, y compris commerciaux, selon les termes de la *licence ouverte* version 1.0.

Dans le cadre du projet, le logiciel Quantum GIS (version 1.8.0) a été utilisé, qui est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) open source multi-plateformes. En combinant toutes les données géographiques dans le même système de coordonnées (Lambert 93), il est possible de leur appliquer de nombreuses opérations spatiales combinant la localisation de ces données et leurs attributs généraux ou se référant à une campagne agricole spécifique. À titre d'exemple, les Fig. A.2 et A.3 illustrent les analyses thématiques effectuées par rapport à la répartition des cultures semées et de la qualité de blé pour la campagne agricole 2014.

1. Maferme-Atland Exploitant est un outil de pilotage complet de l'exploitation intégrant l'ensemble de ses activités (grandes cultures, vigne, élevage) et mettant l'exploitant au cœur de sa filière (www.maferme.com)

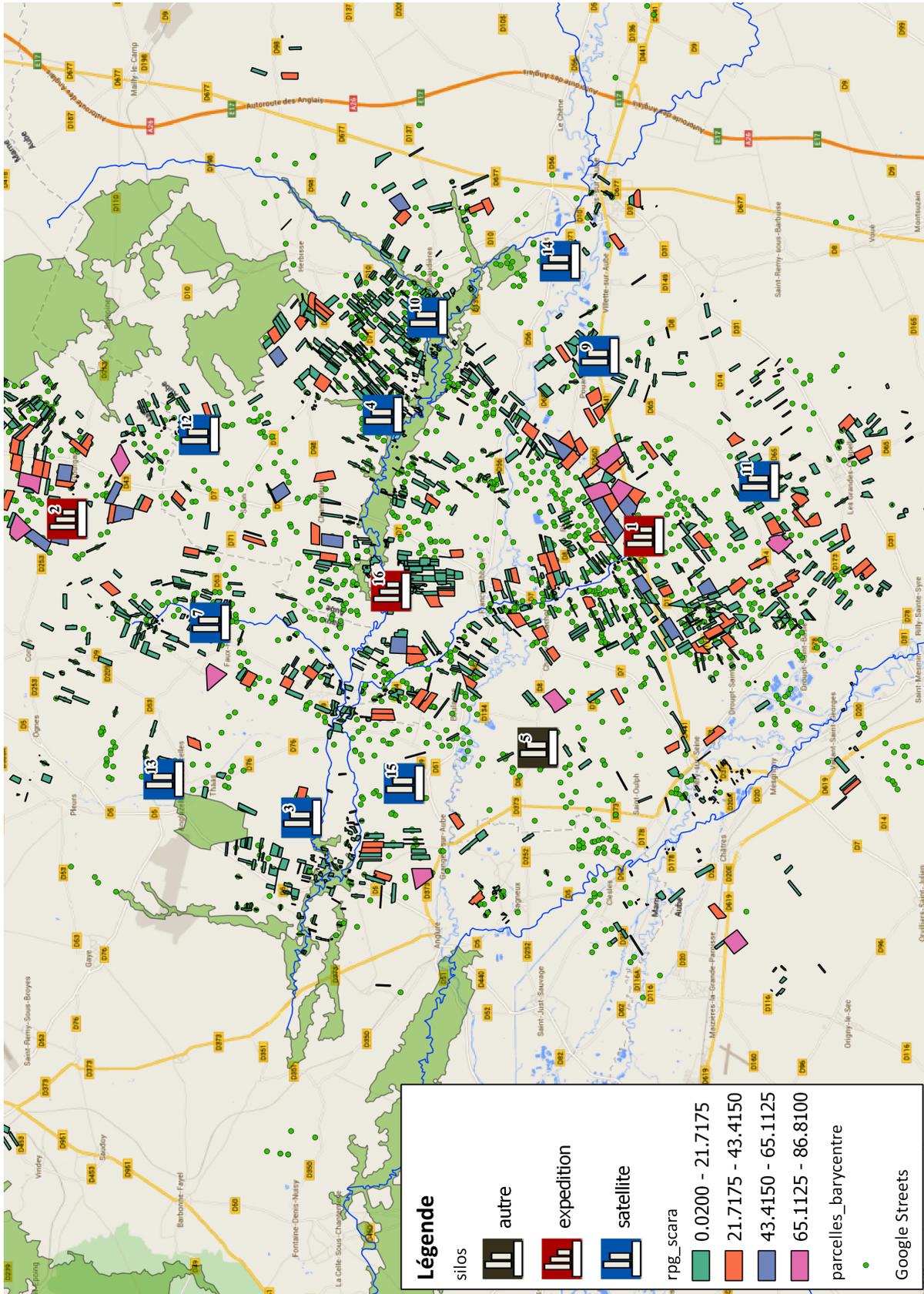


FIGURE A.1 – Carte illustrant le périmètre concerné par la coopérative sous-étude

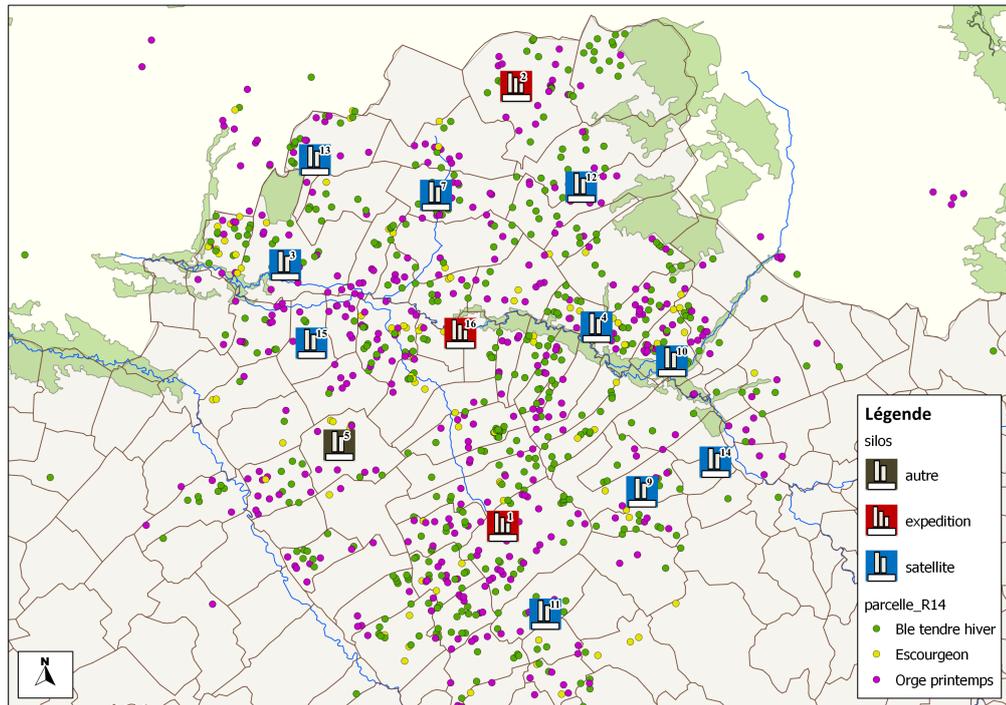


FIGURE A.2 – Campagne agricole 2014 : répartition géographique des cultures semées

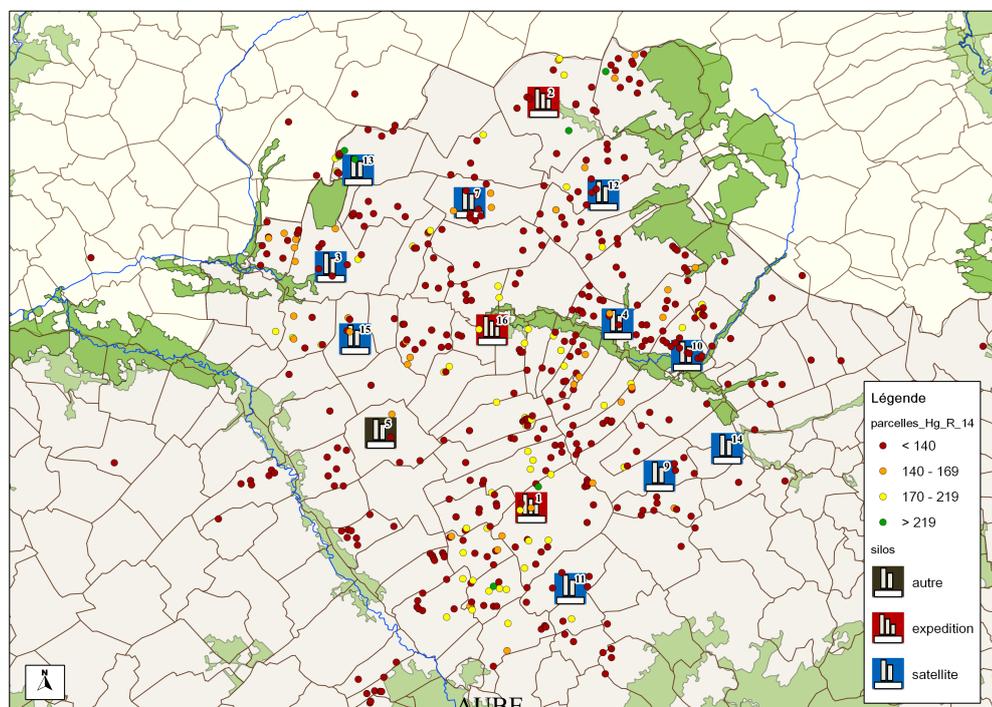


FIGURE A.3 – Campagne agricole 2014 : qualité de blé selon l'indice de chute de Hagberg

B Chaîne logistique agricole dans la littérature : *statistiques*

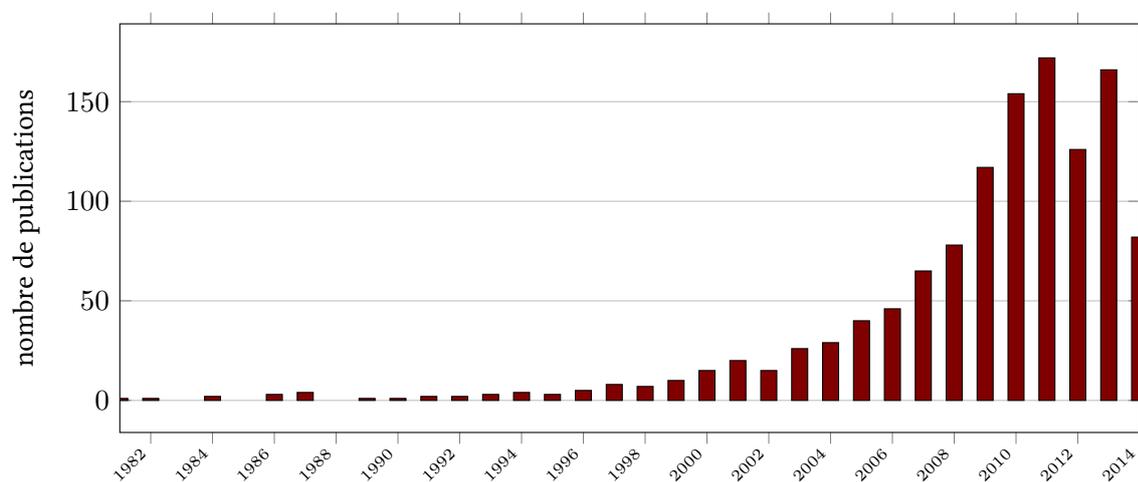


FIGURE B.1 – Évolution du nombre de publications (tous domaines confondus) des termes *agriculture* et *supply chain* dans le titre, le résumé ou les mots-clefs (données tirées du moteur de recherche Scopus, le mois de septembre 2014)

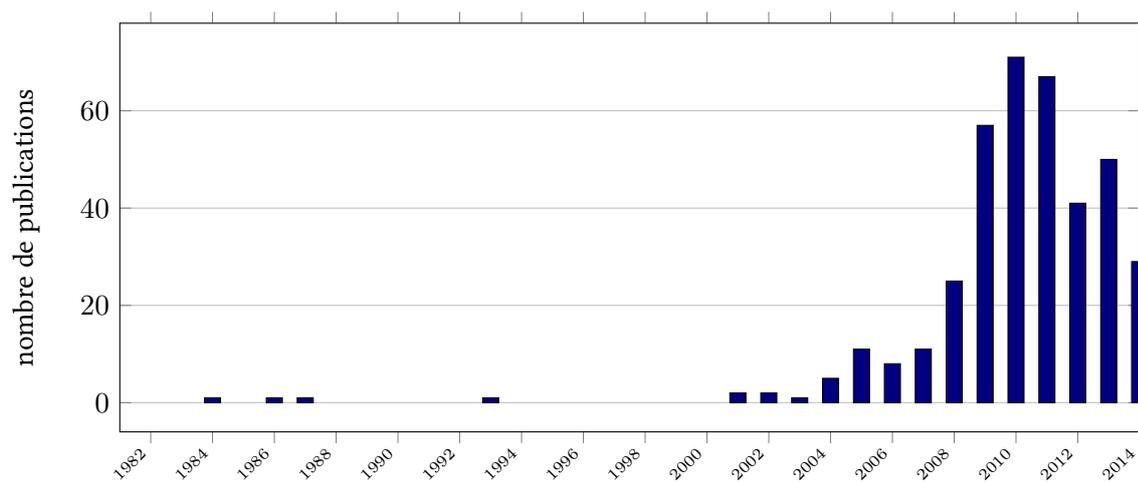


FIGURE B.2 – Évolution du nombre de publications (dans les domaines : *engineering*, *computer science*, *decision sciences* et *mathematics*) des termes *agriculture* et *supply chain* dans le titre, le résumé ou les mots-clefs (données tirées du moteur de recherche Scopus, le mois de septembre 2014)

C Classification taxonomique de céréales

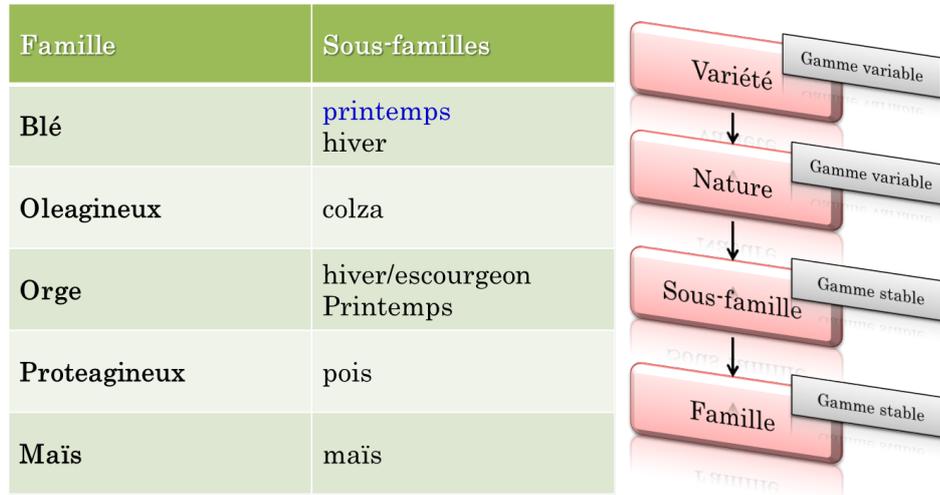


FIGURE C.1 – Classification taxonomique des céréales livrées à la SCARA

D Intégration des logiciels ARENA et CPLEX

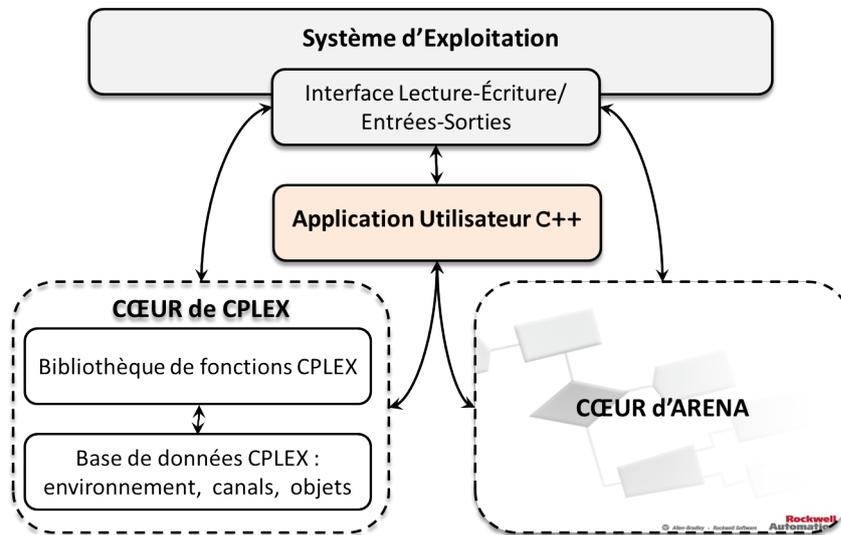


FIGURE D.1 – L'intégration des logiciels ARENA ¹ et C++ ²

1. www.arenasimulation.com/

2. www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/

Bibliographie

- Agustina, D., Lee, C., and Piplani, R. (2014). Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 152(0) :29 – 41.
- Ahumada, O. and Villalobos, J. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain : A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1) :1 – 20.
- Ahumada, O. and Villalobos, J. (2011). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190(1) :339–358.
- Ahumada, O., Villalobos, J., and Mason, A. N. (2012). Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty. *Agricultural Systems*, 112(0) :17 – 26.
- Akkerman, R., Farahani, P., and Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution : a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32(4) :863–904.
- Alcaide-López-de Pablo, D., Dios-Palomares, R., and Prieto, A. (2014). A new multicriteria approach for the analysis of efficiency in the spanish olive oil sector by modelling decision maker preferences. *European Journal of Operational Research*, 234(1) :241 – 252.
- Aldana, H., Lozano, F., and Acevedo, J. (2014). Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in México using MILP optimization. *Biomass and Bioenergy*, 67(0) :372 – 389.
- Ali, O., Verlinden, B., and Van Oudheusden, D. (2009). Infield logistics planning for crop-harvesting operations. *Engineering Optimization*, 41(2) :183–197.
- Altioik, T. and Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Academic Press.
- Amini Fasakhodi, A., Nouri, S., and Amini, M. (2010). Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems ; a multi-objective fractional goal programming approach. *Water Resources Management*, 24(15) :4639–4657.
- Andradóttir, S. (2007). Simulation optimization. In *Handbook of Simulation*, pages 307–333. John Wiley & Sons, Inc.
- Angün, E., Kleijnen, J., den Hertog, D., and Gürkan, G. (2009). Response surface methodology with stochastic constraints for expensive simulation. *Journal of the Operational Research Society*, 60(6) :735–746.
- Arjona, E., Bueno, G., and Salazar, L. (2001). An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32(3) :247 – 264.
- ARVALIS (2003). *Séchage des grains en organisme stockeur : guide pratique*. ARVALIS Institut du végétal, FFCAT.
- Asgari, N., Farahani, R., Rashidi-Bajgan, H., and Sajadieh, M. (2013). Developing model-based software to optimise wheat storage and transportation : A real-world application. *Applied Soft Computing*, 13(2) :1074–1084.
- Averbakh, I. (2000). Minmax regret solutions for minimax optimization problems with uncertainty. *Operations Research Letters*, 27(2) :57 – 65.

- Averbakh, I. (2001). On the complexity of a class of combinatorial optimization problems with uncertainty. *Mathematical Programming*, 90(2) :263–272.
- Averbakh, I. and Lebedev, V. (2004). Interval data minmax regret network optimization problems. *Discrete Applied Mathematics*, 138(3) :289 – 301.
- Azadeh, A., Arani, H. V., and Dashti, H. (2014). A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain. *Energy*, 76(0) :513 – 525.
- Azamathulla, H. (2012). Linear programming for irrigation scheduling - a case study. *Linear Programming : New Frontiers in Theory and Applications*, pages 174–192.
- Bachelet, B. and Yon, L. (2007). Model enhancement : Improving theoretical optimization with simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(6) :703 – 715.
- Bai, Y., Hwang, T., Kang, S., and Ouyang, Y. (2011). Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion. *Transportation Research Part B : Methodological*, 45(1) :162 – 175.
- Baltagi, B. and Song, S. (2006). Unbalanced panel data : A survey. *Statistical Papers*, 47(4) :493–523.
- Belhouchette, H., Blanco, M., Wery, J., and Flichman, G. (2012). Sustainability of irrigated farming systems in a tunisian region : A recursive stochastic programming analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 86(0) :100 – 110.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations Research Letters*, 25(1) :1 – 13.
- Beraldi, P. and Ruszczyński, A. (2005). Beam search heuristic to solve stochastic integer problems under probabilistic constraints. *European Journal Of Operational Research*, 167(1) :35–47.
- Bertsimas, D. and Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations Research*, 52(1) :35–53.
- Beske, P., Land, A., and Seuring, S. (2014). Sustainable supply chain management practices and dynamic capabilities in the food industry : A critical analysis of the literature. *International Journal of Production Economics*, 152(0) :131 – 143.
- Bharati, S. K. and Singh, S. R. (2014). Intuitionistic fuzzy optimization technique in agricultural production planning : A small farm holder perspective. *International Journal of Computer Applications*, 89(6) :17–23.
- Birge, J. R. (1985). Decomposition and partitioning methods for multistage stochastic linear programs. *Operations Research*, 33(5) :989–1007.
- Blommaert, A., Hens, N., and Beutels, P. (2014). Data mining for longitudinal data under multicollinearity and time dependence using penalized generalized estimating equations. *Computational Statistics and Data Analysis*, 71 :667–680.
- Bohle, C., Maturana, S., and Vera, J. (2010). A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research*, 200(1) :245 – 252.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2012a). Gestion des flux de céréales d’une coopérative agricole. In *ROADEF - 13ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d’aide à la décision*, pages 1–2.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2012b). A scenario-based approach for quality risk management : case of annual crops scheduling. In *International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing (META)*, pages 1–2.

- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013a). Combined simulation and optimization approach for an agricultural supply chain redesign. In *Proceeding of the 22nd International Conference on Production Research*, pages 1–10.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013b). A discrete event simulation model for harvest operations under stochastic conditions. In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on*, pages 708–713.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2013c). Simulation et analyse des performances d'une chaîne logistique agricole. In *ROADEF - 14ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, pages 1–2.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014a). Application of panel data and multivariate adaptive regression splines modellings : case of farmers' crop delivery. *Computational Statistics & Data Analysis*, pages 1–12. (soumis, août 2014).
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014b). An application of the discrete event simulation for efficient crop production supply chain. In *10th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMlation (MOSIM)*, pages 1–10, Nancy, France.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014c). A bi-objective chance constrained programming model for efficient crop harvest scheduling. In *18th International Symposium on Inventories (ISIR)*, Budapest, Hungary.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014d). Combined simulation and optimization approach for an agricultural supply chain redesign. *International Journal of Production Economics*, pages 1–10. (soumis, janvier 2014).
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014e). Crop harvest scheduling on a rolling horizon basis : a farm-dedicated operational application. In *EURO Mini-Conference on Stochastic Programming (ECSP)*, Paris, France.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014f). A decision support system for efficient crop production supply chain management. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014*, volume 8583 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 775–790.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014g). Handling uncertainty in agricultural supply chain management : a state of the art. *European Journal of Operational Research*, pages 1–12. (soumis, août 2014).
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014h). An interval programming approach for an operational transportation planning problem. In *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, volume 442 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 117–126.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014i). A multi-step rolled forward chance-constrained model and a proactive dynamic approach for the wheat crop quality control problem. *International Journal of Production Economics*, pages 1–11. (soumis, août 2014).
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014j). A quality risk management problem : case of annual crop harvest scheduling. *International Journal of Production Research*, 52(9) :2682–2695.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., and Labadie, N. (2014k). Système d'aide à la décision pour une chaîne logistique agricole performante. In *ROADEF - 15ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, Bordeaux, France.
- Boussemart, J.-P., Leleu, H., and Ojo, O. (2013). The spread of pesticide practices among cost-efficient farmers. *Environmental Modeling & Assessment*, 18(5) :523–532.

- Burer, S., Jones, P. C., and Lowe, T. J. (2008). Coordinating the supply chain in the agricultural seed industry. *European Journal of Operational Research*, 185(1) :354 – 377.
- Butte, N., Wong, W., Adolph, A., Puyau, M., Vohra, F., and Zakeri, I. (2010). Validation of cross-sectional time series and multivariate adaptive regression splines models for the prediction of energy expenditure in children and adolescents using doubly labeled water. *The Journal of Nutrition*, pages 1516–1523.
- Cadenas, J., Pelta, D. A., Pelta, H., and Verdegay, H. (2004). Application of fuzzy optimization to diet problems in argentinean farms. *European Journal of Operational Research*, 158(1) :218 – 228.
- Caixeta-Filho, J. (2006). Orange harvesting scheduling management : A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6) :637–642.
- Carbone, V. and Meunier, C. (2006). Supply chain management : portée et limites. l’apport de théories des réseaux. *Proceedings of the Annual Conference AIMS-Association Internationale Management Stratégique, Annecy, France*.
- Cardoso, R., da Cruz, A., Wanner, E., and Takahashi, R. (2009). Multi-objective evolutionary optimization of biological pest control with impulsive dynamics in soybean crops. *Bulletin of Mathematical Biology*, 71(6) :1463–1481.
- Carpente, L., Casas-Méndez, B., Jácome, C., and Puerto, J. (2010). A model and two heuristic approaches for a forage harvester planning problem : a case study. *TOP*, 18(1) :122–139.
- Castellazzi, M., Matthews, J., Angevin, F., Sausse, C., Wood, G., Burgess, P., Brown, I., Conrad, K., and Perry, J. (2010). Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Environmental Modelling and Software*, 25(12) :1881 – 1889.
- Catalá, L., Durand, G., Blanco, A., and Bandoni, J. (2013). Mathematical model for strategic planning optimization in the pome fruit industry. *Agricultural Systems*, 115(0) :63 – 71.
- Chan, W. and Schruben, L. (2008). Optimization models of discrete-event system dynamics. *Operations Research*, 56(5) :1218–1237.
- Chang, C., Wang, C., and Jiang, B. (2011). Using data mining techniques for multi-diseases prediction modeling of hypertension and hyperlipidemia by common risk factors. *Expert Systems with Applications*, 38(5) :5507 – 5513.
- Charnes, A. and Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6(1) :73–79.
- Chen, C. and Fan, Y. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 48(1) :150 – 164.
- Chinneck, J. and Ramadan, K. (2000). Linear programming with interval coefficients. *Journal of the Operational Research Society*, 51(2) :209–220.
- Cholette, S. (2009). Mitigating demand uncertainty across a winery’s sales channels through postponement. *International Journal of Production Research*, 47(13) :3587–3609.
- Chou, S., Lee, T., Shao, Y., and Chen, I. (2004). Mining the breast cancer pattern using artificial neural networks and multivariate adaptive regression splines. *Expert Systems with Applications*, 27(1) :133 – 142.
- Cobuloglu, H. and Büyüktaktak, I. (2014). A mixed-integer optimization model for the economic and environmental analysis of biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 67(0) :8 – 23.
- Confalonieri, R., Francone, C., Cappelli, G., Stella, T., Frasso, N., Carpani, M., Bregaglio, S., Acutis, M., Tubiello, F., and Fernandes, E. (2013). A multi-approach software library for estimating crop suitability to environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90(0) :170 – 175.
- Costa, A., dos Santos, L., Alem, D., and Santos, R. (2014). Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, 219(1) :265–283.

- Cucek, L., Martín, M., Grossmann, I., and Kravanja, Z. (2014). Multi-period synthesis of optimally integrated biomass and bioenergy supply network. *Computers & Chemical Engineering*, 66(0) :57 – 70.
- Dantzig, G. (1955). Linear programming under uncertainty. *Management Science*, 1(3-4) :197–206.
- Dantzig, G. B. and Infanger, G. (1993). Multi-stage stochastic linear programs for portfolio optimization. *Annals of Operations Research*, 45(1) :59–76.
- Darby-Dowman, K., Barker, S., Audsley, E., and Parsons, D. (2000). A two-stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture. *The Journal of the Operational Research Society*, 51(1) :83–89.
- Darvishi SalooKolayi, D., Teimouri Yansari, A., and Nasser, S. (2011). Application of fuzzy optimization in diet formulation. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 2(3) :459–468.
- De Avila Pacheco, J. and Morabito, R. (2011). Application of network flow models for the cash management of an agribusiness company. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3) :848–857.
- De Toro, A. and Hansson, P.-A. (2004). Analysis of field machinery performance based on daily soil workability status using discrete event simulation or on average workday probability. *Agricultural Systems*, 79(1) :109 – 129.
- Dentcheva, D., Prékopa, A., and Ruszczyński, A. (2000). Concavity and efficient points of discrete distributions in probabilistic programming. *Mathematical Programming*, 89(1) :55–77.
- Dentcheva, D., Prékopa, A., and Ruszczyński, A. (2001). On convex probabilistic programming with discrete distributions. *Nonlinear Analysis : Theory, Methods and Applications*, 47(3) :1997 – 2009. Proceedings of the Third World Congress of Nonlinear Analysts.
- Dentcheva, D., Prékopa, A., and Ruszczyński, A. (2002). Bounds for probabilistic integer programming problems. *Discrete Applied Mathematics*, 124(1-3) :55–65.
- Doole, G. J. (2012). Evaluation of an agricultural innovation in the presence of severe parametric uncertainty : An application of robust counterpart optimisation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84 :16–25.
- Dos Santos, L., Michelon, P., Arenales, M., and Santos, R. (2011). Crop rotation scheduling with adjacency constraints. *Annals of Operations Research*, 190(1) :165–180.
- Dupacová, J. and Sladký, K. (2002). Comparison of multistage stochastic programs with recourse and stochastic dynamic programs with discrete time. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 82(11-12) :753–765.
- Edwards, R. A., Ross, A. S., Mares, D. J., Ellison, F. W., and Tomlinson, J. D. (1989). Enzymes from rain-damaged and laboratory-germinated wheat I. effects on product quality. *Journal of Cereal Science*, 10(2) :157 – 167.
- Eeden, E. V. and Labuschagne, M. (2012). Sprouting tolerance and falling number in south african hybrid bread wheat cultivars and their parent lines. *Journal of Cereal Science*, 56(3) :754 – 759.
- Ekşioğlu, S., Acharya, A., Leightley, L., and Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4) :1342 – 1352.
- El Bassam, N., Behl, R., and Prochnow, B. (1998). Sustainable agriculture for food, energy and industry : strategies towards achievement. Number 1 in Proceedings of the International Conference Held in Braunschweig, Germany.
- Fao (2009). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Fischer, G., Ermolieva, T., Ermoliev, Y., and Sun, L. (2009). Risk-adjusted approaches for planning sustainable agricultural development. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(4) :441–450.

- Flåm, S. (1985). Nonanticipativity in stochastic programming. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 46(1) :23–30.
- Flaten, O. and Lien, G. (2007). Stochastic utility-efficient programming of organic dairy farms. *European Journal of Operational Research*, 181(3) :1574 – 1583.
- Fleury, G., Lacomme, P., and Tanguy, A. (2006). *Simulation à événements discrets*. Eyrolles.
- Fourer, R. and Lopes, L. (2006). A management system for decompositions in stochastic programming. *Annals of Operations Research*, 142(1) :99–118.
- Frees, E. and Miller, T. (2004). Sales forecasting using longitudinal data models. *International Journal of Forecasting*, 20(1) :99 – 114.
- Friedman, J. (1991). Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, 19(1) :1–67.
- Fu, M. C. (2002). Feature article : Optimization for simulation : Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14(3) :192–215.
- Gabrel, V., Murat, C., and Remli, N. (2008). Best and worst optimum for linear programs with interval right hand sides. In *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*, volume 14 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 126–134.
- Gabrel, V., Murat, C., and Remli, N. (2010). Linear programming with interval right hand sides. *International Transactions in Operational Research*, 17(3) :397–408.
- Gebrezgabher, S., Meuwissen, M., and Oude Lansink, A. (2014). A multiple criteria decision making approach to manure management systems in the netherlands. *European Journal of Operational Research*, 232(3) :643 – 653.
- Glen, J. J. (1987). Mathematical models in farm planning : A survey. *Operations Research*, 35(5) :641–666.
- Golenko-Ginzburg, D., Sinuany-Stern, Z., and Kats, V. (1996). A multilevel decision-making system with multiple resources for controlling cotton harvesting. *International Journal of Production Economics*, 46-47(0) :55 – 63.
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., and Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152(0) :9 – 28.
- Griffith, A., Haque, M., and Epplin, F. (2014). Cost to produce and deliver cellulosic feedstock to a biorefinery : Switchgrass and forage sorghum. *Applied Energy*, 127(0) :44 – 54.
- Growe-Kuska, N., Heitsch, H., and Römisch, W. (2003). Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems. In *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, volume 3, pages 1–7.
- Guan, S., Nakamura, M., Shikanai, T., and Okazaki, T. (2008). Hybrid petri nets modeling for farm work flow. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2) :149 – 158.
- Guan, Z. and Philpott, A. (2011). A multistage stochastic programming model for the new zealand dairy industry. *International Journal of Production Economics*, 134(2) :289 – 299.
- Gupta, A., Harboe, R., and Tabucanon, M. (2000). Fuzzy multiple-criteria decision making for crop area planning in narmada river basin. *Agricultural Systems*, 63(1) :1 – 18.
- Hagberg, S. (1960). A rapid method for determining alpha-amylase activity. *Cereal Chemistry*, (37) :218–222.
- Hall, J., Matos, S., and Silvestre, B. (2012). Understanding why firms should invest in sustainable supply chains : a complexity approach. *International Journal of Production Research*, 50(5) :1332–1348.
- Haneveld, W. and Stegeman, A. (2005). Crop succession requirements in agricultural production planning. *European Journal of Operational Research*, 166(2) :406 – 429.

- Harris, D. R. and Fuller, D. Q. (2014). Agriculture : Definition and overview. In *Encyclopedia of Global Archaeology*, pages 104–113. Springer New York.
- Hasani, A., Zegordi, S., and Nikbakhsh, E. (2012). Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 50(16) :4649–4669.
- Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning : data mining, inference and prediction*. Springer, 2 edition.
- Heikkinen, T. and Pietola, K. (2009). Investment and the dynamic cost of income uncertainty : The case of diminishing expectations in agriculture. *European Journal of Operational Research*, 192(2) :634 – 646.
- Heitsch, H. and Römisch, W. (2003). Scenario reduction algorithms in stochastic programming. *Computational Optimization and Applications*, 24(2-3) :187–206.
- Heitsch, H. and Römisch, W. (2007). A note on scenario reduction in stochastic for two stage stochastic programs. *Operations Research Letters*, 35(6) :731–736.
- Henrion, R., Küchler, C., and Römisch, W. (2008). Discrepancy distances and scenario reduction in twostage stochastic mixed-integer programming. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 4(2).
- Higgins, A., Miller, C., Archer, A., Ton, T., Fletcher, C., and McAllister, R. (2010). Challenges of operations research practice in agricultural value chains. *The Journal of the Operational Research Society*, 61(6) :964–973.
- Hladík, M. (2009). Optimal value range in interval linear programming. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 8(3) :283–294.
- Houshyar, E., Azadi, H., Almassi, M., Davoodi, M., and Witlox, F. (2012). Sustainable and efficient energy consumption of corn production in southwest iran : Combination of multi-fuzzy and DEA modeling. *Energy*, 44(1) :672 – 681.
- Hovelaque, V., Duvaleix-Tréguer, S., and Cordier, J. (2009). Effects of constrained supply and price contracts on agricultural cooperatives. *European Journal of Operational Research*, 199(3) :769 – 780.
- Hu, M., Chen, Y.-H., and Huang, J.-C. (2014). A sustainable vegetable supply chain using plant factories in taiwanese markets : A nash-cournot model. *International Journal of Production Economics*, 152(0) :49 – 56.
- ITCF (2001). *Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux : guide pratique*. ITCF céréaliers de France.
- Itoh, T., Ishii, H., and Nanseki, T. (2003). A model of crop planning under uncertainty in agricultural management. *International Journal of Production Economics*, 81-82(0) :555 –558.
- Jang, W. and Klein, C. (2011). Supply chain models for small agricultural enterprises. *Annals of Operations Research*, 190(1) :359–374.
- Janová, J. (2012). Crop planning optimization model : the validation and verification processes. *Central European Journal of Operations Research*, 20(3) :451–462.
- Jena, S. and Poggi, M. (2013). Harvest planning in the brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. *European Journal of Operational Research*, 230(2) :374 – 384.
- Junqueira, R. and Morabito, R. (2012). Production and logistics planning considering circulation taxes in a multi-plant seed corn company. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84(0) :100 – 110.
- Kall, P. and Wallace, S. N. (1994). *Stochastic Programming*. JOHN WILEY and SONS.
- Kasivisvanathan, H., Ng, R., Tay, D., and Ng, D. (2012). Fuzzy optimisation for retrofitting a palm oil mill into a sustainable palm oil-based integrated biorefinery. *Chemical Engineering Journal*, 200-202(0) :694 – 709.

- Kasperski, A. and Zielinski, P. (2006). The robust shortest path problem in series-parallel multidigraphs with interval data. *Operations Research Letters*, 34(1) :69 – 76.
- Kaut, M. and Wallace, S. W. (2003). Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming. In *World Wide Web, Stochastic Programming E-Print Series*, pages 14–2003.
- Kim, J., Realff, M. J., and Lee, J. H. (2011). Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 35(9) :1738–1751.
- Kleijnen, J. P., van Beers, W., and van Nieuwenhuysse, I. (2010). Constrained optimization in expensive simulation : Novel approach. *European Journal of Operational Research*, 202(1) :164 – 174.
- Kleijnen, J. P. and Wan, J. (2007). Optimization of simulated systems : Optquest and alternatives. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3) :354 – 362.
- Klerkx, L. and Leeuwis, C. (2008). Matching demand and supply in the agricultural knowledge infrastructure : Experiences with innovation intermediaries. *Food Policy*, 33(3) :260 – 276.
- Kostin, A., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F., Bagajewicz, M., and Jiménez, L. (2012). Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(3) :359 – 376.
- Kouser, S. and Qaim, M. (2011). Impact of bt cotton on pesticide poisoning in smallholder agriculture : A panel data analysis. *Ecological Economics*, 70(11) :2105 – 2113.
- Kuo, F. Y. and Sloan, I. H. (2005). Lifting the curse of dimensionality. *Notices of the AMS*, 52 :1320–1329.
- Laguna, M. and Marti, R. (2002). The optquest callable library. In *Optimization Software Class Libraries*, volume 18 of *Operations Research. Computer Science Interfaces Series*, pages 193–218.
- Law, A. M. and Kelton, W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. 3. Hardcover.
- Le Gal, P.-Y., Merot, A., Moulin, C.-H., Navarrete, M., and Wery, J. (2010). A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, 25(2) :258 – 268.
- Lee, T., Chiu, C., Chou, Y., and Lu, C. (2006). Mining the customer credit using classification and regression tree and multivariate adaptive regression splines. *Computational Statistics and Data Analysis*, 50(4) :1113 – 1130.
- Leung, S., Tsang, S., Ng, W., and Wu, Y. (2007). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 181(1) :224 – 238.
- Li, Y., Liu, J., and Huang, G. (2014). A hybrid fuzzy-stochastic programming method for water trading within an agricultural system. *Agricultural Systems*, 123(0) :71 – 83.
- Liu, G., Zhang, J., and Tang, W. (2014). Joint dynamic pricing and investment strategy for perishable foods with price-quality dependent demand. *Annals of Operations Research*, pages 1–20.
- Lodree Jr., E. and Uzochukwu, B. (2008). Production planning for a deteriorating item with stochastic demand and consumer choice. *International Journal of Production Economics*, 116(2) :219 – 232.
- Lu, H., Huang, G., and He, L. (2011). An inexact rough-interval fuzzy linear programming method for generating conjunctive water-allocation strategies to agricultural irrigation systems. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9) :4330 – 4340.
- Lucas, M. T. and Chhajer, D. (2004). Applications of location analysis in agriculture : A survey. *The Journal of the Operational Research Society*, 55(6) :561–578.
- Lurette, A., Aubron, C., and Moulin, C.-H. (2013). A simple model to assess the sensitivity of grassland dairy systems to scenarios of seasonal biomass production variability. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93(0) :27 – 36.

- Maatman, A., Schweigman, C., Ruijs, A., and van Der Vlerk, M. H. (2002). Modeling farmers' response to uncertain rainfall in Burkina Faso - a stochastic programming approach. *Operations Research*, 50(3) :399–414.
- Maqsood, I., Huang, G., Huang, Y., and Chen, B. (2005). ITOM : an interval-parameter two-stage optimization model for stochastic planning of water resources systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(2) :125–133.
- McKinion, J., Jenkins, J., Akins, D., Turner, S., Willers, J., Jallas, E., and Whisler, F. (2001). Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32(3) :213–228.
- Melouk, S., Fontem, B. A., Waymire, E., and Hall, S. (2014). Stochastic resource allocation using a predictor-based heuristic for optimization via simulation. *Computers & Operations Research*, 46(0) :38 – 48.
- Mercier, L. and Van Hentenryck, P. (2008). Amsaa : A multistep anticipatory algorithm for online stochastic combinatorial optimization. In *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, volume 5015 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 173–187.
- Miguéis, V., Camanho, A., and Cunha, J. (2013). Customer attrition in retailing : An application of multivariate adaptive regression splines. *Expert Systems with Applications*, 40(16) :6225 – 6232.
- Miller, B. and Wagner, H. (1965). Chance-constrained programming with joint constraints. *Operational Research*, 13(6) :930–945.
- Miller, W., Leung, L., Azhar, T., and Sargent, S. (1997). Fuzzy production planning model for fresh tomato packing. *International Journal of Production Economics*, 53(3) :227 – 238.
- Minoux, M. (2009). Robust linear programming with right-hand-side uncertainty, duality and applications robust linear programming with right-hand-side uncertainty, duality and applications. In *Encyclopedia of Optimization*, pages 3317–3327.
- Moghaddam, K. and DePuy, G. (2011). Farm management optimization using chance constrained programming method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77(2) :229–237.
- Molaei, M. (2011). Relative advantage of producing agricultural crops in ardabil province (Iran). *World Applied Sciences Journal*, 15(6) :860–866.
- Montemanni, R., Barta, J., Mastrolilli, M., and Gambardella, L. M. (2007). The robust traveling salesman problem with interval data. *Transportation Science*, 41(3) :366–381.
- Morgan, D. R., Eheart, J. W., and Valocchi, A. J. (1993). Aquifer remediation design under uncertainty using a new chance constrained programming technique. *Water Resources Research*, 29(3) :551–561.
- Moussouni, N. and Aidene, M. (2012). An algorithm for optimization of cereal output. *Acta Applicandae Mathematicae*, 119(1) :113–127.
- Mundlak, Y., Butzer, R., and Larson, D. (2012). Heterogeneous technology and panel data : The case of the agricultural production function. *Journal of Development Economics*, 99(1) :139 – 149.
- Munhoz, J. R. and Morabito, R. (2014). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company : A brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107(0) :45 – 57.
- Nagasawa, H., Kotani, M., and Morizawa, K. (2009). Optimal cooperative harvesting patterns of agricultural fresh products in case of multiple farmers and multiple markets under periodical flowering. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 52(4) :417–432.
- Nielsen, L., Jørgensen, E., and Højsgaard, S. (2011). Embedding a state space model into a markov decision process. *Annals of Operations Research*, 190(1) :289–309.

- Ohlmann, J. and Jones, P. (2011). An integer programming model for optimal pork marketing. *Annals of Operations Research*, 190(1).
- Osmani, A. and Zhang, J. (2013). Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties. *Energy*, 59(0) :157 – 172.
- Pahl, J. and Voß, S. (2014). Integrating deterioration and lifetime constraints in production and supply chain planning : A survey. *European Journal of Operational Research*, 238(3) :654 – 674.
- Paksoy, T., Pehlivan, N. Y., and Özceylan, E. (2012). Application of fuzzy optimization to a supply chain network design : A case study of an edible vegetable oils manufacturer. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6) :2762 – 2776.
- Paris, J.-L., Tautou-Guillaume, L., and Pierreval, H. (2001). Dealing with design options in the optimization of manufacturing systems : An evolutionary approach. *International Journal of Production Research*, 39(6) :1081–1094.
- Pasty, J. (2004). Les débouchés non alimentaires des produits agricoles : un enjeu pour la France et l'union européenne. *Avis et rapports du conseil économique et social*, (12) :274.
- Peña, T., Lara, P., and Castrodeza, C. (2009). Multiobjective stochastic programming for feed formulation. *Journal of the Operational Research Society*, 60(12) :1738–1748.
- Peña Haro, S., Pulido-Velazquez, M., and Llopis-Albert, C. (2011). Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 26(8) :999 – 1008.
- Person, A., Grimm, H., and Ng, A. (2008). A metamodel-assisted steady-state evolution strategy for simulation-based optimization. In *Trends in Intelligent Systems and Computer Engineering*, volume 6 of *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pages 1–13.
- Perten, H. (1964). Application of the falling number method for evaluating alpha-amylase activity. *Cereal chemistry*, 41(3) :127–140.
- Pierreval, H. and Paris, J.-L. (2003). From simulation optimization to simulation configuration of systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(1) :5 – 19.
- Pierreval, H. and Tautou, L. (1997). Using evolutionary algorithms and simulation for the optimization of manufacturing systems. *IIE Transactions*, 29(3) :181–189.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., and Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1) :1 – 11.
- Piramuthu, S. and Zhou, W. (2013). RFID and perishable inventory management with shelf-space and freshness dependent demand. *International Journal of Production Economics*, 144(2) :635 – 640.
- Powell, W. B. (2007). *Approximate Dynamic Programming : Solving the Curses of Dimensionality (Wiley Series in Probability and Statistics)*. Wiley-Interscience.
- Prékopa, A. (1990). Dual method for the solution of a one-stage stochastic programming problem with random rhs obeying a discrete probability distribution. *Zeitschrift für Operations Research*, 34(6) :441–461.
- Puterman, M. L. (1994). *Markov Decision Processes : Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons, Inc., 1 edition.
- Qi, R., Ma, Y., Hu, B., De Reffye, P., and Cournède, P.-H. (2010). Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding : A case study on maize. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1) :96–105.
- Rajaram, K. and Corbett, C. (2002). Achieving environmental and productivity improvements through model-based process redesign. *Operations Research*, 50(5) :751–763.

- Rockafellar, R. and Wets, R.-B. (1976). Nonanticipativity and L1-martingales in stochastic optimization problems. In *Stochastic Systems : Modeling, Identification and Optimization, II*, volume 6 of *Mathematical Programming Studies*, pages 170–187.
- Rockafellar, R. T. and Wets, R. J.-B. (1991). Scenarios and policy aggregation in optimization under uncertainty. *Mathematics of Operations Research*, 16(1) :119–147.
- Rong, A., Akkerman, R., and Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1) :421 – 429.
- Roose, P. (2007). SI-COTS : Aide à l'intégration de COTS products. *Workshop MADSI (Méthodes avancées de développement des systèmes d'information) - 25ème congrès INFORSID*.
- Roux, N. (2013). La volatilité des marchés mondiaux des matières premières agricoles et l'évolution des prix à la consommation de l'alimentation en France. *DGCCRF éco*.
- Roy, B. (2010). Robustness in operational research and decision aiding : A multi-faceted issue. *European Journal of Operational Research*, 200(3) :629 – 638.
- Saxena, A., Goyal, V., and Lejeune, M. (2010). MIP reformulation of the probabilistic set covering problem. *Mathematical Programming*, 121(1) :1–31.
- Sazvar, Z., Mirzapour Al-e hashem, S., Baboli, A., and Akbari Jokar, M. (2014). A bi-objective stochastic programming model for a centralized green supply chain with deteriorating products. *International Journal of Production Economics*, 150(0) :140 – 154.
- Scara (2011). Rapport d'activité et de développement durable 2010-2011. (1).
- Schweigman, C., Bakker, E., and Snijders, T. (1990). Operations research as a tool for analysis of food security problems. *European Journal of Operational Research*, 49(2) :211 – 221.
- Semenzato, R., Lozano, S., and Valero, R. (1995). A discrete event simulation of sugar cane harvesting operations. *The Journal of the Operational Research Society*, 46(9) :1073–1078.
- Shapiro, A., Dentcheva, D., and Ruszczyński, A. (2009). *Lectures on stochastic programming : Modelling and Theory*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Sharma, D. K. and Jana, R. (2009). Fuzzy goal programming based genetic algorithm approach to nutrient management for rice crop planning. *International Journal of Production Economics*, 121(1) :224 – 232.
- Shastri, Y., Hansen, A., Rodríguez, L., and Ting, K. (2011). A novel decomposition and distributed computing approach for the solution of large scale optimization models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1) :69 – 79.
- Shi, B., Lu, H., Ren, L., and He, L. (2014). A fuzzy inexact two-phase programming approach to solving optimal allocation problems in water resources management. *Applied Mathematical Modelling*, 38(23) :5502 – 5514.
- Soregaroli, C., Sckokai, P., and Moro, D. (2011). Agricultural policy modelling under imperfect competition. *Journal of Policy Modeling*, 33(2) :195 – 212.
- Sorensen, E. and Gilheany, J. F. (1970). A simulation model for harvest operations under stochastic conditions. *Management Science*, 16(8) :549–565.
- Soyster, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21(5) :1154–1157.
- Sukumara, S., Faulkner, W., Amundson, J., Badurdeen, F., and Seay, J. (2013). A multidisciplinary decision support tool for evaluating multiple biorefinery conversion technologies and supply chain performance. *Clean Technologies and Environmental Policy*, pages 1–18.

- Swisher, J., Hyden, P. D., Jacobson, S. H., and Schruben, L. W. (2004). A survey of recent advances in discrete input parameter discrete-event simulation optimization. *IIE Transactions*, 36(6) :591–600.
- Tan, B. and Cömnden, N. (2012). Agricultural planning of annual plants under demand, maturation, harvest and yield risk. *European Journal of Operational Research*, 220(2) :539–549.
- Tan, R., Aviso, K., Barilea, I., Culaba, A., and Cruz Jr, J. (2012). A fuzzy multi-regional input-output optimization model for biomass production and trade under resource and footprint constraints. *Applied Energy*, 90(1) :154 – 160.
- Taniguchi, F., Yamada, T., and Kataoka, S. (2008). Heuristic and exact algorithms for the max-min optimization of the multi-scenario knapsack problem. *Computers & Operations Research*, 35(6) :2034–2048.
- Teimoury, E., Nedaei, H., Ansari, S., and Sabbaghi, M. (2013). A multi-objective analysis for import quota policy making in a perishable fruit and vegetable supply chain : A system dynamics approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93(0) :37 – 45.
- Thakur, M., Wang, L., and Hurburgh, C. (2010). A multi-objective optimization approach to balancing cost and traceability in bulk grain handling. *Journal of Food Engineering*, 101(2) :193 – 200.
- Thornley, J. and France, J. (2007). *Mathematical Models in Agriculture : Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*. CABI Publishing Series. CABI Pub.
- Tong, F. and Guo, P. (2013). Simulation and optimization for crop water allocation based on crop water production functions and climate factor under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 37(14-15) :7708 – 7716.
- Tsai, I. and Peng, C. (2012). A panel data analysis for housing affordability in Taiwan. *Journal of Economics and Finance*, 36(2) :335–350.
- Uhlemair, H., Karschin, I., and Geldermann, J. (2014). Optimizing the production and distribution system of bioenergy villages. *International Journal of Production Economics*, 147, Part A(0) :62 – 72.
- Vamanan, M., Wang, Q., Batta, R., and Szczerba, R. J. (2004). Integration of COTS software products ARENA & CPLEX for an inventory/logistics problem. *Computers & Operations Research*, 31(4) :533 – 547.
- Van der Vorst, J. G., Tromp, S.-O., and Zee, D.-J. v. d. (2009). 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.
- Vizvári, B., Lakner, Z., Csizmadia, Z., and Kovács, G. (2011). A stochastic programming and simulation based analysis of the structure of production on the arable land. *Annals of Operations Research*, 190(1) :325–337.
- Wagner, J. M. and Berman, O. (1995). Models for planning capacity expansion of convenience stores under uncertain demand and the value of information. *Annals of Operations Research*, 59(1) :19–44.
- Walther, G., Schatka, A., and Spengler, T. S. (2012). Design of regional production networks for second generation synthetic bio-fuel. a case study in northern germany. *European Journal of Operational Research*, 218(1) :280 – 292.
- Woodward, S. J. R., Romera, A. J., Beskow, W. B., and Lovatt, S. J. (2008). Better simulation modelling to support farming systems innovation : Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3) :235–252.
- Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, volume 1. The MIT Press, 2 edition.
- Xie, Y., Li, Y., Huang, G., and Li, Y. (2010). An interval fixed-mix stochastic programming method for greenhouse gas mitigation in energy systems under uncertainty. *Energy*, 35(12) :4627 – 4644.
- Yakovleva, N., Joseph, S., and Thomas, S. (2012). Sustainable benchmarking of supply chains : the case of the food industry. *International Journal of Production Research*, 50(5) :1297–1317.

- Yaman, E., Karasan, O., and Nar, M. (2001). The robust spanning tree problem with interval data. *Operations Research Letters*, 29 :2001.
- You, F. (2013). Design of biofuel supply chains under uncertainty with multiobjective stochastic programming models and decomposition algorithm. *Computer Aided Chemical Engineering*, 32 :493–498.
- Yu, G. (1996). On the max-min 0-1 knapsack problem with robust optimization applications. *Operations Research*, 44(2) :407–415.
- Yue, D., You, F., and Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization : Overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, 66(0) :36 – 56.
- Zanoni, S. and Zavanella, L. (2012). Chilled or frozen ? decision strategies for sustainable food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(2) :731 – 736.
- Zhang, M., Küçükyavuz, S., and Goel, S. (2014). A branch-and-cut method for dynamic decision making under joint chance constraints. *Management Science*, 60(5) :1317–1333.
- Zhang, X., Huang, G., and Nie, X. (2009). Optimal decision schemes for agricultural water quality management planning with imprecise objective. *Agricultural Water Management*, 96(12) :1723 – 1731.
- Zhang, X., Huang, G. H., Nie, X., and Lin, Q. (2011). Model-based decision support system for water quality management under hybrid uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 38(3) :2809–2816.
- Zheng, Y.-Z., Song, Q., and Chen, S. (2013). Multiobjective fireworks optimization for variable-rate fertilization in oil crop production. *Applied Soft Computing*, 13(11) :4253 – 4263.
- Zhu, W. and Zhang, H. (2013). A nonparametric regression method for multiple longitudinal phenotypes using multivariate adaptive splines. *Frontiers of Mathematics in China*, 8(3) :731–743.
- Znidarsik, M., Bohanec, M., and Zupan, B. (2008). Modelling impacts of cropping systems : Demands and solutions for DEX methodology. *European Journal of Operational Research*, 189(3) :594 – 608.
- Zondervan, E., Nawaz, M., de Haan, A., Woodley, J., and Gani, R. (2011). Optimal design of a multi-product biorefinery system. *Computers & Chemical Engineering*, 35(9) :1752 – 1766.

Valeria BORODIN

Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

Année 2014

Optimisation et simulation d'une chaîne logistique : application au secteur de l'agriculture

Dans le cadre de la thèse portant sur l'optimisation et simulation de la chaîne logistique agricole, c'est l'activité de collecte qui est concernée, la période de moisson étant primordiale en matière de quantité et qualité de production, i.e. des revenus pour les agriculteurs et des richesses pour le territoire. Plus spécifiquement, celle-ci implique les opérations de récolte, transport et stockage des céréales, réalisées par plusieurs exploitations agricoles, dispersées géographiquement.

En vue d'aborder la complexité et la nature dynamique de la chaîne logistique d'une coopérative agricole française dans son intégralité, nous avons développé un système d'aide à la décision, qui s'inscrit dans la cadre de la recherche opérationnelle (RO) et plus précisément se réfère à l'optimisation linéaire, robuste et stochastique; la simulation de flux à événements discrets; ainsi qu'à leur couplage. De plus, la synergie créée entre les outils de la RO, le système d'information géographique, la statistique inférentielle et prédictive rend le système d'aide à la décision compétitif et performant, capable de répondre convenablement au besoin de l'industriel.

Mots clés : agriculture - logistique (organisation) - recherche opérationnelle - simulation, méthodes de - programmation stochastique - méthodes statistiques - systèmes d'aide à la décision.

Supply Chain Optimization and Simulation: an Application to Agricultural Sector

To overcome the new challenges facing agricultural sector, imposed by globalization, changing market demands and price instability, the crop production supply chain must particularly be very reactive, flexible, with a high yield and at low cost. Its improving and eventual re-configuration can lead to an upgrade in efficiency, responsiveness, business integration and make it able to confront the market competitiveness.

The thesis is thus placed in this particular context and aims to support decision making in crop harvesting activity, which is considered the pivotal stage in the cereal production circuit owing to its high cost and impact on the returns earned. Managing the harvest activity involves gathering, transportation and storage operations, performed by a collection of agricultural holdings geographically dispersed. Besides its practical relevance, this thesis forms part of the Operational Research (OR) and more specifically, refers to the linear and stochastic programming, discrete event simulation, and their coupling. In addition, the synergy created between OR, inferential and predictive statistics, geographical information system tools makes the decision support system competitive, efficient and responsive.

Keywords: agriculture - business logistics - operations research - simulation methods - stochastic programming - statistical methods - decision support systems.

Thèse réalisée en partenariat entre :

